

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

AGENTES INTELIGENTES DIFUSOS:

**Uma Ferramenta Híbrida para Exploração de Processos
Espaciais em Zonas Costeiras**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Rafael Medeiros Sperb

Dr. Roberto C. S. Pacheco

Orientador

Florianópolis, 2002

**AGENTES INTELIGENTES DIFUSOS:
Uma Ferramenta Híbrida para Exploração de Processos
Espaciais em Zonas Costeiras**

Rafael Medeiros Sperb

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de "Doutor em Engenharia" e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Florianópolis, 22 de outubro de 2002.

Edson Pacheco Paladini, Dr.
*Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção - UFSC*

Banca Examinadora:

Roberto Carlos dos Santos Pacheco, Dr. Eng.
Orientador

Renu Khator, Ph.D., examinadora externa

Milton Lafourcade Asmus, Dr., examinador externo

Vinícius Medina Kern, Dr. Eng.

Aran Bey Tcholakian Morales, Dr. Eng.

Dedicatória

A NOVIDADE

A novidade veio dar à praia
Na qualidade rara de sereia
Metade, o busto de uma Deusa Maia
Metade, um grande rabo de baleia
 A novidade era o máximo
 Do paradoxo estendido na areia
 Alguns a desejar seus beijos de Deusa
 Outros a desejar seu rabo pra ceia
Ó, mundo tão desigual
Tudo é tão desigual
Ó, de um lado este carnaval
Do outro a fome total
 E a novidade que seria um sonho
 O milagre risonho da sereia
 Virava um pesadelo tão medonho
 Ali naquela praia, ali na areia
A novidade era a guerra
Entre o feliz poeta e o esfomeado
Estraçalhando uma sereia bonita
Despedaçando o sonho pra cada lado
 Ó, mundo tão desigual
 Tudo é tão desigual
 Ó, de um lado este carnaval
 Do outro a fome total

Gilberto Gil, 1986.

A crise ambiental é fruto de uma crise de percepção e de valores.
Uma crise de sobrevivência para a raça humana, para todas as
espécies, para o planeta azul.

Dedico meu esforço
À minha companheira, Rosiane,
Ao meu filhote, Arthur,
Aos meus familiares,
E aos antigos e novos amigos,
Que um dia perceberam
O valor do busto da Deusa Maia.

Agradecimentos

Sou profundamente grato ao amigo Luiz Rodrigues Maia Neto, por ter não apenas me apresentado ao Dr. Roberto C. S. Pacheco, meu orientador, mas também por ter aberto meu horizonte para as possibilidades da Inteligência Artificial na área de Gestão Ambiental. Não menos grato sou ao meu orientador, pela confiança depositada em minha pessoa e em meus esforços, dando-me liberdade e apoio para explorar os caminhos construídos ao longo deste trabalho e conduzindo-me a concluí-lo com o êxito esperado.

Ao amigo Modro, agradeço a amizade e a parceria nos estudos e nas diversas tentativas de aplicar alguma técnica de IA à resolução de problemas ambientais. Na mesma proporção agradeço ao Rodrigo Cabral as horas de conversas em Tampa, quando discutimos aspectos operacionais e de implementação do Modelo Baseado em Agentes Difusos. A ele devo a cessão do algoritmo de inferência difusa empregado nesta tese. Sou grato também ao acadêmico Rodrigo Tripodi, de cujo preciso domínio e criatividade em programação fiz uso integral para o desenvolvimento do protótipo contemplado por este trabalho. Devo ao Ingo (que me apelidou de “pouca prática”), à Irene “Furacão” e à Tatá o apoio e o carinho em nossa estada em Tampa. Para este grupo de amigos tenho eterna gratidão.

Este trabalho contou com o apoio direto e indireto de diversas pessoas, dentro e fora do PPGEP. Devo mencionar a Dra. Renu Khator, minha anfitriã junto à *University of South Florida* durante o programa de bolsa sanduíche do CNPq, e seu companheiro Dr. Suresh Khator. A CAPES e ao CNPq e, por extensão, aos contribuintes, agradeço a bolsa que possibilitou a minha dedicação ao doutorado. Agradeço ao Prof. Fernando L. Diehl, meu chefe junto ao CTTMar/UNIVALI, o apoio financeiro para o desenvolvimento do protótipo de minha tese. A Klein, Polette e Guilherme agradeço o tempo que me deram para explicar o modelo, e pô-lo em questionamento. Ao Giovanni devo não apenas a revisão gramatical deste trabalho, mas minhas primeiras aulas de computação, conduzidas, muitas vezes, por telefone. Quem diria, naquela época, aonde eu chegaria como usuário de microcomputador. A todos que de algum modo contribuíram para meu êxito e que por questões de espaço não se encontram aqui mencionados, agradeço do fundo de meu coração.

À minha companheira, em especial, agradeço pela sua compreensão nos momentos que, mesmo de corpo presente, estive distante, concentrado em meus pensamentos e na evolução da tese. Pelo seu apoio, incentivo e crença, a ela devo a conclusão deste trabalho. A ela agradeço também a chegada de nosso filhote, Arthur, que trouxe luz à minha vida no momento da conclusão deste trabalho.

Obrigado a Deus e aos meus pais pela minha existência.

Resumo

A dinâmica das interações de grupos de usuários com o meio ambiente tem se intensificado a ponto de ameaçar a disponibilidade dos recursos naturais. As previsões para as zonas costeiras, em especial, apontam para o esgotamento de recursos e para a perspectiva de superpopulação. O estudo do impacto de ações humanas nessas zonas por meio de modelos matemáticos apresenta limitações em capturar a natureza da percepção dos atores e em expressar a sua conseqüente distribuição no espaço. A presente tese propõe um modelo de simulação baseado em agentes para a análise de cenários de ocupação de zonas costeiras, a partir da modelagem da percepção espacial desses agentes, construída através de Lógica Difusa. A modelagem baseada em agentes trata-se de novo enfoque para simulações e envolve a reprodução do mundo real em um virtual, onde são conduzidos experimentos. Nesse universo virtual, cada agente é representado como uma entidade independente, capaz de agir localmente, em resposta à sua percepção, comportamento e alterações de parâmetros ambientais. A Lógica Difusa vem sendo empregada com bastante sucesso no manuseio da incerteza associada ao mundo real e permite a utilização de termos lingüísticos em sistemas computacionais. O desenvolvimento de um protótipo possibilitou a comprovação da viabilidade de aplicação do modelo em casos reais, bem como a captura de comportamento real de indivíduos em zonas costeiras. Além disso, a aplicação do modelo em um caso real demonstra o seu poder de previsibilidade e o subsídio a estudos ambientais por meio de simulação computacional, indicando um grande potencial para testes de hipóteses sobre o papel que cada indivíduo representa no funcionamento global de um sistema.

Palavras-Chave: Agentes Inteligentes; Modelo Baseado em Agentes; Lógica Difusa; Inferência Difusa; Gerenciamento Costeiro.

Abstract

The interaction dynamics between user groups and environment has increased to threaten natural resources availability. Overpopulation and environmental resources loss are common predictions for coastal zones in particular. Numerical models have been used to study human impact in these zones, with limited capability to handle actor's perception and spatial distribution though. This dissertation proposes an Agent-based Model simulation for analyzing land occupation scenarios from people's spatial perception and behavior that are coded through fuzzy logic. Agent-based Model is a recent simulation approach, which involves reproducing a real world system into a virtual one, where experiments shall be performed. In the virtual universe, each agent is represented by an independent entity that is capable of acting locally in response to its perception, coded behavior and environmental changes. Fuzzy logic, in addition, has been used with relative success to handle real world uncertainty and linguistic terms in computational systems. A prototype of this hybrid model has demonstrated its viability as well as its ability to handle people's spatial perception and behavior. A study case verifies the model potential application in studies and predictions of land occupation in a coastal area, including hypothesis test of each actor's role in the system functioning.

Keywords: Intelligent Agents; Agent-based Modeling; Fuzzy Logic; Fuzzy Inference System; Coastal Zone Management.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	MOTIVAÇÃO	15
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	17
1.3	RELEVÂNCIA	18
1.4	OBJETIVOS	22
1.4.1	<i>Geral</i>	22
1.4.2	<i>Específicos</i>	22
1.5	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	22
1.6	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	23
1.7	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	AGENTES INTELIGENTES	25
2.1.1	<i>Um Breve Histórico</i>	25
2.1.2	<i>Definição</i>	28
2.1.3	<i>Atributos</i>	30
2.2	SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES	32
2.2.1	<i>O Paradigma de Agentes em Simulações</i>	32
2.2.2	<i>Propriedades</i>	33
2.2.3	<i>Aplicações</i>	42
2.3	LÓGICA DIFUSA	50
2.3.1	<i>Introdução</i>	51
2.3.2	<i>Conjuntos Difusos</i>	52
2.3.3	<i>Raciocínio Aproximado e Variáveis Lingüísticas</i>	56
2.3.4	<i>Controle Difuso</i>	58
2.4	APLICAÇÃO DA LÓGICA DIFUSA EM MODELOS BASEADOS EM AGENTES	63
3	METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO	64
3.1	A BUSCA DO CONHECIMENTO	64
3.2	ESTRUTURA GERAL DA PESQUISA	66
3.2.1	<i>Investigação</i>	66

3.2.2	<i>Intervenção</i>	66
3.2.3	<i>Avaliação</i>	67
3.3	DOCUMENTAÇÃO	67
4	MODELO PROPOSTO	68
4.1	GERENCIAMENTO COSTEIRO INTEGRADO	68
4.1.1	<i>Definição</i>	68
4.1.2	<i>Modelo Conceitual do Sistema Costeiro</i>	69
4.2	MODELO BASEADO EM AGENTES E O GERENCIAMENTO COSTEIRO	72
4.2.1	<i>Universo Virtual</i>	73
4.2.2	<i>Percepção, Comportamento e Lógica Difusa</i>	76
4.3	PROTÓTIPO	81
4.3.1	<i>Agentes Inteligentes Difusos</i>	81
4.3.2	<i>Mapa mental</i>	81
4.3.3	<i>Agenda</i>	92
4.3.4	<i>Implementação do Protótipo</i>	93
5	ESTUDO DE CASO	97
5.1	MODELO BASEADO EM AGENTES DIFUSOS	97
5.1.1	<i>Etapas para a Construção de um Caso</i>	97
5.1.2	<i>Teste de Similaridade</i>	99
5.2	PROCESSO DE OCUPAÇÃO DA ZONA COSTEIRA	102
5.2.1	<i>Gerenciamento Costeiro e Legislação Ambiental</i>	102
5.2.2	<i>Comportamento de Grupos de Usuários Costeiros</i>	103
5.3	CASO DA PRAIA DE INGLESES	104
5.3.1	<i>Definição do Problema</i>	105
5.3.2	<i>Desenvolvimento do Caso para a Praia de Ingleses</i>	106
5.3.3	<i>Análise Espacial e Estudo do Comportamento</i>	107
5.3.4	<i>Simulação</i>	116
6	DISCUSSÃO	122
6.1	ESTUDO DE CASO	122
6.1.1	<i>Características e Limitações do Protótipo</i>	122
6.2	MODELO CONCEITUAL	131

6.2.1	<i>Viabilidade do Emprego de Lógica Difusa em MBA</i>	131
6.2.2	<i>Determinação de Comportamentos a partir de Análise Espacial</i>	133
6.2.3	<i>Similaridade das Simulações com a Realidade</i>	133
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	134
7.1	CONTRIBUIÇÕES	134
7.2	RECOMENDAÇÕES	136
7.2.1	<i>Recomendações para o protótipo</i>	136
7.2.2	<i>Recomendações para o modelo conceitual</i>	136
7.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	137
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138
	ANEXOS	151
	A DEFINIÇÕES DE AGENTES	152
	B SCRIPT DE CONFIGURAÇÃO PARA A SIMULAÇÃO II	154

Lista de Figuras

Figura 1. Desenho esquemático apresentando o escopo da tese. _____	23
Figura 2. Exemplo de aplicação de agentes na área militar (DANIELS, 2000). _____	34
Figura 3. Exemplo de modelo conceitual com ênfase nos processos (JØRGENSEN, 1994). _____	37
Figura 4. (a) Análise de sistemas para modelagem numérica, com ênfase nos processos (setas); e (b) para modelagem baseada em agentes, com ênfase no comportamento dos elementos. _____	38
Figura 5. Abstração de comportamento de agentes a partir da observação do mundo real, e sua codificação em regras de comportamento (JOHNSON; LANCASTER, 2000). _____	39
Figura 6. Exemplo aplicado ao estudo de uma assembléia comunitária para negociação sobre usos de recursos naturais (HRABER e MILNE, 1997). _____	40
Figura 7. Abstração de um sistema em nível micro , em que elementos interagem a partir da modelagem de seus comportamentos, e a conseqüente emergência de padrões de comportamento e propriedades mais complexas em nível macro. _____	41
Figura 8. Modelo conceitual para o LUCC envolvendo atores, instituições e meio ambiente (MANSON, 2000). _____	48
Figura 9. Agent-based Dynamic Spatial Simulation – ADSS proposto por Manson (2000). _____	49
Figura 10. O modelo proposto por Ligtenberg, Bregt e Lammeren (2001) possui o mesmo enfoque dado por Manson, unindo Modelos Baseados em Agentes com Autômato Celular. _____	50
Figura 11. Representação da densidade populacional através da (a) lógica clássica, suas (b) interfaces de incerteza, e (c) Lógica Difusa. _____	53
Figura 12. Exemplo do funcionamento dos graus de pertinência. _____	55
Figura 13. Formatos mais comuns para a representação de conjuntos difusos. _____	57
Figura 14. Variação cultural do valor de variáveis lingüísticas. _____	58
Figura 15. Representação esquemática de um sistema de controle (a) tradicional e (b) um difuso. _____	59
Figura 16. Exemplo de base de regras difusa. _____	60
Figura 17. Exemplo de fuzificação e inferência difusa. _____	61
Figura 18. Exemplo de operação de intersecção e união em conjuntos difusos. _____	62
Figura 19. Exemplo de operação maxmin e defuzificação. _____	62
Figura 20. Modelo esquemático baseado na relação predador/presa (CAMPOS; HILL, 2000). _____	63
Figura 21. Fases do ciclo de geração do conhecimento. _____	65
Figura 22. Modelo conceitual do sistema costeiro proposto por Weide (1994). _____	69

Figura 23. (a) Abstração do modelo de Weide, segundo os “olhos” de Manson; e (b) exemplo de abordagem utilitária entre praia e turismo. _____	70
Figura 24. Modelos de usos para a zona costeira (CINCIN-SAIN; KNECHT, 1998). _____	71
Figura 25. Exemplo do enfoque utilitário para com o sistema costeiro com vistas à elaboração do Modelo Baseado em Agentes. _____	76
Figura 26. Percepção espacial e evolução de processos espaciais (MEYERS, 2000). _____	78
Figura 27. Representação do atributo centro através de conjuntos difusos. _____	78
Figura 28. Elementos de uma regra de comportamento. _____	79
Figura 29. Etapas da construção de um <i>mapa mental</i> . _____	82
Figura 30. Exemplo de <i>matriz de percepção</i> espacial. _____	83
Figura 31. Conjuntos difusos associados à <i>matriz de percepção</i> para o exemplo. _____	83
Figura 32. Máquina de inferência difusa. _____	84
Figura 33. Matriz com o resultado da inferência difusa (mapa mental) para o exemplo. _____	84
Figura 34. Defuzificação através do método do centróide. _____	89
Figura 35. Exemplo de agenda com base em preferência. _____	92
Figura 36. Interface do Simulador. _____	95
Figura 37. Esquema com as etapas para a construção de um caso. _____	98
Figura 38. Representação gráfica do teste de similaridade. _____	101
Figura 39. Exemplos de usos ilegais de áreas ao longo da costa de Santa Catarina, segundo grupos de usuários. _____	104
Figura 40. Localização da Praia de Ingleses. _____	105
Figura 41. Vista aérea da Praia de Ingleses (Fotos: IPUF, 2000). _____	106
Figura 42. Representação esquemática do sistema costeiro da Praia de Ingleses com ênfase na ocupação do espaço. _____	107
Figura 43. Crescimento urbano da Praia de Ingleses obtido a partir da fotointerpretação. _____	108
Figura 44. Evolução das ruas e ocupação da Praia de Ingleses (1978-1998). _____	109
Figura 45. Base cartográfica e análise espacial para a Praia de Ingleses. _____	111
Figura 46. Mapeamento dos atributos espaciais e suas respectivas <i>matrizes de percepção</i> para o estudo de caso da Praia de Ingleses. _____	112
Figura 47. Variáveis lingüísticas para os atributos espaciais do estudo de caso. _____	113
Figura 48. Variáveis lingüísticas para as preferências dos usuários. _____	113
Figura 49. Representação dos conjuntos difusos através de coordenadas cartesianas. _____	113

Figura 50. Representação gráfica dos conjuntos difusos de percepção e preferência dos usuários do estudo de caso.	114
Figura 51. Matriz cruzamento de atributos visando à determinação de preferências.	115
Figura 52. Regras de comportamento para o agente centro segundo a sintaxe adotada pelo <i>script</i> de configuração.	115
Figura 53. <i>Mapas mentais</i> para modelo conceitual da Praia de Ingleses.	116
Figura 54. Lista de elementos necessários à configuração de um <i>script</i> .	117
Figura 55. Sintaxe do <i>script</i> de configuração.	117
Figura 56. Sumário dos elementos das simulações.	118
Figura 57. Resultado e teste de similaridade para Simulação I.	118
Figura 58. <i>Snapshots</i> da evolução da Simulação II.	120
Figura 59. Resultado e teste de similaridade para a Simulação II.	121
Figura 60. Interpretação prática do índice de similaridade S_{45} .	123
Figura 61. Representação esquemática do mecanismo de comunicação entre os agentes através do impacto (seta azul) causado à matriz de percepção periferia pelo usuário 2.	124
Figura 62. Segregação entre agentes a partir da utilização do impacto.	126
Figura 63. Exemplo de propriedade emergente causada pela (a) presença de máximos e mínimos locais e (b) a sua consequência em termos de distribuição: racionalidade limitada.	128
Figura 64. Exemplo de propriedade emergente: mistura entre os tipos de agentes nas áreas entre o centro e periferia.	129
Figura 65. Sumário do modelo conceitual de um MBA Difuso.	132
Figura 66. Exemplo de simulação com regras mal modeladas, resultando numa distribuição bastante distante da encontrada na realidade.	133

Lista de Tabela

Tabela 1. Índices de similaridade encontrados para as Simulações I e II. _____ 119

Lista de Abreviaturas

GCI – Gerenciamento Costeiro Integrado

IPUF – Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis

MBA – Modelo Baseado em Agentes

MBA Difuso – Modelo Baseado em Agentes Difusos

SCD – Sistema de Controle Difuso

SDE – Secretaria Estadual de Desenvolvimento Econômico

SIG – Sistema de Informações Geográficas

CAPÍTULO

1 INTRODUÇÃO

“A sociedade contemporânea necessita conservar não apenas áreas isoladas e confinadas a parques e reservas, mas aprender e incorporar a noção de preservar as funções benéficas em sua relação diária com o meio ambiente em que vive.”

Tandy Agardy, 1997

1.1 MOTIVAÇÃO

A sociedade contemporânea vem enfrentando a pior crise da história da humanidade. Essa crise tem raízes profundas nos padrões de desenvolvimento econômico e de exploração a que o ambiente natural vem sendo submetido. Porém, o gradual reconhecimento de que os recursos naturais são finitos, somado aos grandes problemas e acidentes ambientais testemunhados nas últimas três décadas, vem aumentando significativamente a preocupação de governos e população em relação ao meio ambiente¹ (CINCIN-SAIN, 1993). Lentamente, o mundo toma consciência da relação que existe entre a qualidade de vida humana e a condição do ambiente natural, que nos nutre e sustenta por incontáveis maneiras (AGARDY, 1997).

Entre as áreas que se encontram sujeitas à intensa pressão antropogênica, destacam-se as zonas costeiras. Suas características naturais há muito vêm sendo utilizadas e desfrutadas pelos humanos. Nessa faixa de transição entre terra e mar, existem alguns dos mais valiosos e produtivos *habitats* da biosfera. Grandes quantidades de energia nela circulam e geram abundância e diversidade de vida, características que atraem para ela os mais variados interesses e atividades

¹ Neste trabalho o termo “meio ambiente” se aplica tanto ao meio ambiente antrópico quanto ao meio ambiente natural. Quando necessário, será feita a distinção entre ambos.

humanas (CLARK, 1996; CANESSA, 1998). Por conseqüência, as zonas costeiras² do mundo hospedam mais da metade da população mundial, com dois terços das cidades mais populosas do planeta (SORENSEN; MCCREARY, 1990; UNCED, 1992; CINCIN-SAIN, 1993; PERNETTA; ELDER, 1993; NORSE, 1993; WCC, 1993; AGARDY, 1997). Infelizmente, a mesma costa que uma vez parecia infinita em sua capacidade de suprir as necessidades humanas vem demonstrando o contrário. A degradação direta e indireta das terras e águas costeiras vem causando redução da produtividade natural, aumentando, conseqüentemente, conflitos de uso, bem como causando a “mutilação” das funções ambientais que os seres humanos valorizam e de que dependem para seu bem-estar (AGARDY, 1997; CINCIN-SAIN; KNECHT, 1998). Em um horizonte bastante curto de tempo, sua ocupação caótica, somada aos padrões insustentáveis de uso, conduzirá à exaustão de seus recursos, uma tendência que será agravada quando a população que vive nessa região atingir, em 2020, segundo estimativas das Nações Unidas (UNCED, 1992) e da *World Coast Conference* (WCC, 1993), a marca de dois terços da população total do planeta.

O crescente número de pessoas e atividades na zona costeira traz consigo o aumento da competição por recursos e espaço (CINCIN-SAIN; KNECHT, 1998), um quadro que vem chamando a atenção de cientistas, políticos e comunidade, que estão de acordo sobre a necessidade de se organizar o desenvolvimento na região costeira, sob pena do aumento das disputas entre grupos de interesse e uso insustentável de seus recursos. Conceitualmente, o gerenciamento costeiro surgiu dessa necessidade e vem sendo empregado tanto como um ramo científico quanto como um processo político que envolve economia e sociedade.

Entre os esforços científicos responsáveis pela consolidação do gerenciamento costeiro, encontra-se o estudo do comportamento dos grupos de usuários³. Deriva

² A zona, área ou região costeira apresenta diferentes definições. Algumas se limitam a uma zona demarcada entre a linha de maré e uma linha paralela à costa, a 200 metros de distância. Outras definições buscam abranger unidades físicas, juntamente com um enfoque mais sistêmico, como o caso da delimitação por bacias hidrográficas. A zona costeira mencionada por estes autores consiste em uma faixa paralela à costa, a cerca de 60 km de distância desta.

³ O termo “grupo de usuários” é utilizado com freqüência em gerenciamento costeiro para designar grupos de interesse, como pescadores, empresários do turismo, etc.

da ciência a noção de que indivíduos tendem a se agrupar e a se organizar segundo interesses e necessidades comuns, os quais são defendidos em situações de disputa com outros grupos de interesse. O processo político, por sua vez, encontra no reconhecimento da existência desses grupos subsídios para a resolução de conflitos e, de maneira geral, para a condução de programas de gerenciamento costeiro. Considerando a elaboração e condução de políticas, é de crucial importância a compreensão do modo como os diferentes grupos de usuários percebem⁴ o meio ambiente e se relacionam com ele para suprir suas necessidades. Essa percepção está diretamente relacionada à forma de uso e ocupação da zona costeira.

Assumida a premissa acima, este trabalho propõe o desenvolvimento de um *Modelo de Simulação Baseado em Agentes Inteligentes e Lógica Difusa* para apoio ao estudo do comportamento espacial de grupos de usuários em regiões costeiras, a partir de atributos espaciais⁵.

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O estudo do comportamento espacial de grupos de usuários na zona costeira se baseia em informações socioeconômicas, culturais, e da própria relação do ser humano com seu meio ambiente – ambiente em que ele se insere. É inevitável em estudos dessa natureza o enfoque multidisciplinar e o emprego de questionários, entrevistas, consultas em jornais e revistas, observação, além de outras formas de coleta de informações para a geração de hipóteses sobre o comportamento dos grupos de usuários. Uma parte significativa dessas informações tem caráter subjetivo pelo emprego de termos lingüísticos, ou é baseada em conhecimento

⁴ Alguns dos significados atribuídos pelo dicionário Aurélio ao termo “perceber” são: enxergar, divisar, atentar, observar. A partir desses significados, a definição de percepção no contexto desta tese se refere à observação de atributos espaciais relacionados às necessidades de cada indivíduo, ou grupo de indivíduos.

⁵ Este trabalho considera como atributo espacial qualquer característica espacial que venha a ser importante para um determinado grupo de usuário (e.g., praia, centro, periferia, rua, supermercado, parque, etc.).

heurístico de difícil explicação. Nesse cenário, qualquer teste de hipótese se torna complexo.

Para que estudos dessa natureza não percam a objetividade em extrapolações e divagações sobre o comportamento espacial dos diferentes grupos de usuários da zona costeira, torna-se necessário o emprego de instrumentos que facilitem a exploração do tema em foco, possibilitando assim a realização de testes das hipóteses propostas. A determinação do instrumento empregado para esses testes é essencial para o sucesso do estudo. Entre as opções de instrumentos disponíveis, merecem destaque os modelos, por agregarem o potencial de simulações passíveis de verificação e validação, e o possível emprego em planejamento por meio de projeções. Existe, porém, carência de modelos de simulação que contemplem expressões lingüísticas, evidenciadas na elucidação do processo de raciocínio lógico humano. Considerando essa lacuna como uma oportunidade, esta tese propõe o desenvolvimento de uma ferramenta híbrida fundamentada na aplicação de modelos e simulações baseadas no paradigma de Agentes Inteligentes⁶ e Lógica Difusa. Assim sendo, a tese busca responder às três questões básicas listadas a seguir.

- É viável desenvolver modelos de simulação dinâmica espacial para a região costeira com base em Agentes Inteligentes e em Lógica Difusa?
- Padrões de comportamento de usuários extraídos e/ou abstraídos de análises espaciais podem servir de subsídio à construção desses modelos?
- Os resultados das simulações guardam correspondência com o comportamento real dos usuários de zonas costeiras?

1.3 RELEVÂNCIA

A qualidade ambiental, em termos gerais, não deve ser vista como uma abstração de nossa aspiração por um meio ambiente natural saudável, mas como uma materialização de todas as funções benéficas que ela desempenha para a

⁶ O paradigma de programação baseada em agentes inteligentes, derivado da área de Inteligência Artificial, vem lentamente encontrando suporte e novas aplicações na área de modelagem e simulações.

manutenção da vida na Terra. Esse enfoque considera acima de tudo o meio ambiente natural como uma propriedade comum, que, como tal, deve ser gerenciada sob essa perspectiva, o que beneficia a todos (JENTOFT; McCAY; WISLON, 1998). É inquestionável a afirmação de que vivemos num planeta dominado pelo ser humano, cujas atividades transformam e alteram essas funções. Desse modo, não é admissível acreditar que o meio ambiente natural possa ser gerenciado à parte das atividades humanas. Essas se expandiram a tal ponto que afetaram virtualmente todos os ecossistemas terrestres (GREENS; KLOMP, 2000). A sociedade contemporânea necessita não apenas conservar áreas isoladas e confinadas a parques e reservas, mas também aprender e incorporar a noção de preservar as funções benéficas do meio ambiente natural em sua relação diária com o meio ambiente em que vive (AGARDY, 1997).

As considerações acima dão ênfase à relação que existe entre o meio ambiente natural e suas funções e o ser humano. A qualidade ambiental está diretamente relacionada à existência das funções benéficas do meio ambiente natural, mesmo quando estas não são reconhecidas pelos seres humanos. Uma vez que o ser humano é o maior agente transformador do meio ambiente natural e, por conseqüência, da qualidade ambiental, é necessária a compreensão da percepção que este têm para com os atributos espaciais. No caso específico do gerenciamento costeiro, que utiliza planos, programas, leis e regulamentações para promover a utilização sustentável dos recursos naturais e, por conseqüência, manter a qualidade ambiental das zonas costeiras, é importante considerar os valores e as necessidades de quem utiliza essa região. Em outras palavras, a percepção que o ser humano possui sobre as diferentes características da zona costeira determina seu modo de relacionamento com ela. Por extensão, o reconhecimento de padrões de comportamento por parte de grupos de usuários da zona costeira tem caráter instrumental na condução de medidas de gerenciamento⁷.

⁷ O termo “medidas de gerenciamento” se refere a planos, programas, leis e regulamentações quando orientados ao gerenciamento costeiro.

Amalgamar a percepção e o comportamento espacial de grupos de usuários com a ocupação e alteração do meio ambiente na zona costeira é uma tarefa árdua. Existe uma carência de ferramentas que viabilizem a exploração do funcionamento de sistemas complexos, como os sistemas antrópicos e naturais. Modelos matemáticos vêm sendo usados, com bastante propriedade ao longo dos anos, para tentar explicar os fenômenos que ocorrem nesses sistemas (e.g., CONSTANZA; WAINGER; BOCKSTAEL, 1996; VOINOV *et al.*, 1999). Contudo, esses modelos são de difícil cognição para pesquisadores de áreas tradicionalmente distantes da Matemática. O estudo da relação entre sociedade e meio ambiente exige ferramentas que possibilitem a incorporação de informações de natureza incerta, oriundas de uma análise subjetiva e, muitas vezes, baseadas em regras heurísticas. O surgimento da Lógica Difusa (KLIR; YUAN, 1995; KLIR; CLAIR; YUAN, 1997), em 1965, abriu novos horizontes para a exploração de informações dessa natureza em modelos por possuir a habilidade de lidar com termos incertos da linguagem e do raciocínio humano, habilidade que permite que as observações feitas por pesquisadores se transformem em regras de simulação bastante próximas do cotidiano, da realidade, ao invés de regras codificadas em equações matemáticas, sem sentido real para muitos pesquisadores, muito menos para políticos responsáveis pela definição de políticas e programas de gerenciamento costeiro.

Uma técnica de Inteligência Artificial que vem tendo um significativo desenvolvimento, principalmente na área de simulações é a de Agentes Inteligentes. A possibilidade de construção de um universo artificial onde agentes habitam e vivem em estreita relação entre si e com os atributos deste universo tem grande apelo para estudos que envolvam o ser humano, meio ambiente, percepção e comportamento. Dois aspectos são de extrema importância nessa técnica, quando comparada com modelos numéricos: a facilidade de se inserirem novos componentes à simulação, o que permite o aumento gradual de sua complexidade; e a noção de emergência, no sentido de que regras simples de interação entre os elementos da simulação geram padrões de comportamento mais complexos para o sistema.

A associação do potencial oferecido pelo emprego da Lógica Difusa com o paradigma de modelagem baseada em Agentes Inteligentes proposto por esta tese

ainda é um campo aberto para exploração em Inteligência Artificial. Os exemplos existentes dessa associação encontrados no levantamento bibliográfico tratam, em sua maioria, de aplicações em robótica. Na robótica, a Lógica Difusa vem sendo empregada na navegação de robôs (SAFFIOTTI, 1997; SKARMETA; BARBERÁ; ALONSO, 1999; SAFFIOTTI, 2001; SAFFIOTTI; RUSPINI, 2001; TSOURVELOUDIS; VALAVANIS; HEBERT, 2001; BLOCH; SAFFIOTTI, 2002). Alguns estudos buscam unir redes neurais com Lógica Difusa para estudos de evolução e adaptação de comportamento em agentes diante das novas situações (MICHAUD; LACHIVER; DINH, 1996).

A união da Lógica Difusa com Agentes Inteligentes visando aos estudos de percepção de atributos espaciais, os quais são determinantes do comportamento de ocupação e uso do espaço (e.g., preferência de usuários por residências próximas à praia), inaugura uma linha de pesquisa desconhecida e inexplorada. Associada ao modelo proposto, encontra-se a analogia feita entre a zona costeira e seus grupos de usuários e o universo artificial onde Agentes Inteligentes atuam em simulações. Hipóteses sobre as percepções e as necessidades de grupos de usuários em face de atributos espaciais, e a conseqüente distribuição no espaço, podem ser desenvolvidas e testadas a partir de regras que empregam termos lingüísticos, encapsuladas em agentes.

Esse enfoque de simulação deve ser visto com caráter eminentemente exploratório e instrumental. Em outras palavras, a simulação visa evidenciar a relação existente entre grupos de usuários e o meio ambiente, bem como entre eles próprios. A comprovação das hipóteses de comportamento busca gerar conhecimento que se oriente para a elaboração de medidas mais eficazes de gerenciamento costeiro e conseqüente manutenção da qualidade ambiental.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Geral

Desenvolver um modelo de simulação baseado em Agentes Inteligentes e Lógica Difusa para estudo do comportamento de usuários em zonas costeiras, visando à avaliação de suas percepções espaciais e de sua forma de distribuição no meio ambiente.

1.4.2 Específicos

- Propor um modelo conceitual para um ambiente de simulação que utilize o paradigma de modelagem baseada em Agentes Inteligentes, orientado à modelagem do comportamento espacial de grupos de usuários nas zonas costeiras;
- utilizar lógica e inferência difusa para representar o comportamento de grupos de usuários em relação ao ambiente da simulação;
- implementar um protótipo do modelo conceitual proposto; e
- realizar testes de simulação por meio do emprego de um estudo de caso visando responder às três perguntas colocadas ao final do item 1.2 (Definição do Problema).

1.5 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Por se tratar de um trabalho que envolve conhecimento oriundo de diversas disciplinas, o êxito desta tese depende de uma delimitação clara de seu escopo. A união de Agentes Inteligentes e Lógica Difusa para estudos relacionados ao comportamento espacial de grupos de usuários na zona costeira encontra-se em nível de motivação, conforme ilustrado pela Figura 1. O desenvolvimento de uma ferramenta que combine as duas técnicas de Inteligência Artificial para o fim proposto consiste no problema-base desta tese, delimitando seu escopo à proposição de um modelo conceitual, sua implementação em um protótipo e subsequente teste para verificação da viabilidade de utilização em estudos associados a grupos de usuários da zona costeira e suas percepções para com atributos espaciais.

Temas associados a disciplinas como psicologia (percepção, cognição e comportamento), ciências sociais, geografia humana e gerenciamento costeiro, quando abordados, são considerados somente de modo instrumental à condução do trabalho. O leitor é convidado ao aprofundamento destes temas através da literatura pertinente, caso considere necessário.

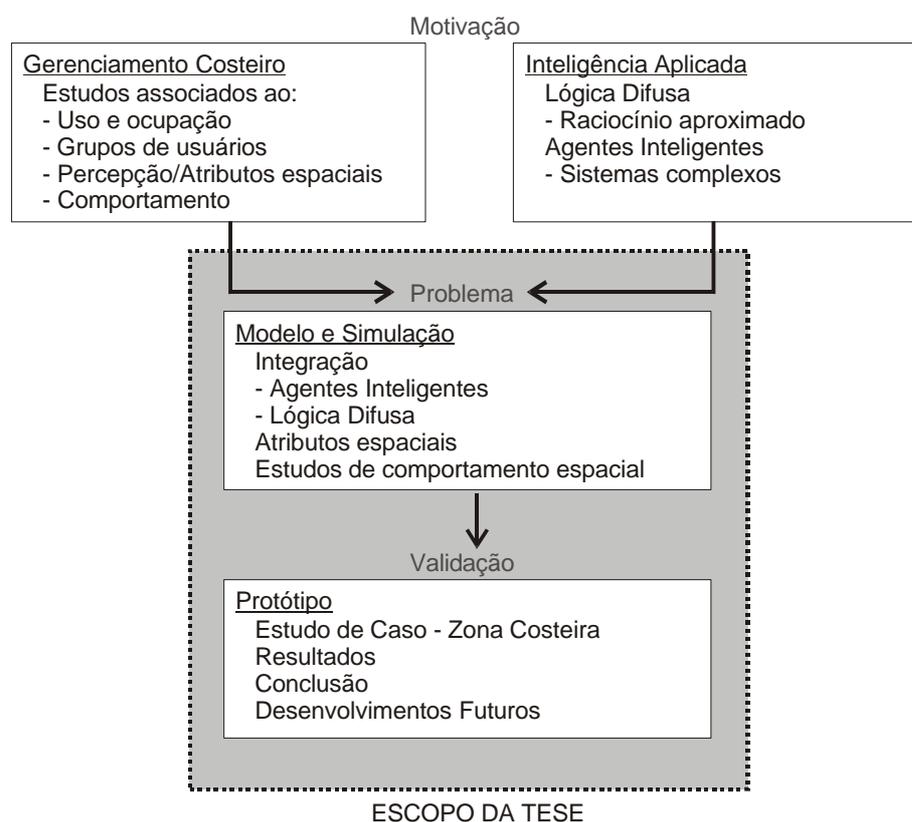


Figura 1. Desenho esquemático apresentando o escopo da tese

1.6 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Esta tese é composta de sete capítulos, organizados de modo a apresentar o desenvolvimento do tema segundo o título do trabalho. Neste primeiro capítulo, o leitor é chamado a se inteirar dos aspectos gerais associados a esta tese. Nele consta a introdução, onde são apresentados a motivação para o desenvolvimento deste trabalho, sua relevância para o gerenciamento costeiro, os objetivos que a tese busca alcançar, a delimitação e as limitações do trabalho.

A fundamentação teórica referente à Teoria de Agentes, a Modelos Baseados em Agentes e à Lógica e Sistemas Difusos, necessária ao desenvolvimento do modelo proposto pela tese, é apresentada e discutida no capítulo 2.

A metodologia de desenvolvimento da pesquisa que norteia o trabalho é apresentada no capítulo 3.

No capítulo 4 é apresentada em detalhes a concepção do Modelo Baseado em Agentes Difusos, em que se delinea o modelo conceitual do sistema e sua implementação em um protótipo. Modelo e protótipo são testados por meio de um estudo de caso em zonas costeiras. Esse estudo de caso é apresentado em detalhes no capítulo 5.

Os resultados encontrados na simulação do estudo de caso bem como o desempenho do modelo conceitual são discutidos no capítulo 6. A tese é encerrada com o capítulo 7, onde as contribuições do trabalho, as recomendações para futuros desenvolvimentos e as considerações finais são apresentadas.

1.7 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

É importante destacar as limitações que este estudo pode ter. Primeiramente, é necessário considerar o estágio embrionário em que o tema proposto se encontra. Poucos estudos nesta linha foram desenvolvidos até o momento, o que reduz o número de possíveis alternativas para a proposição do modelo.

A abordagem eminentemente espacial na integração de MBA com Lógica e Sistemas Difusos encontra limitações diante da consideração de aspectos não espaciais. A obtenção do comportamento dos agentes a partir de análise espacial e a própria definição de atributos espaciais e seus valores não compõem os aspectos do modelo proposto, pela complexidade que esse assunto pode assumir. Assim, adotou-se o comportamento dos agentes abstraído pelo autor.

Finalmente, o protótipo encontra limitações operacionais associadas ao tempo e recursos disponíveis para sua implementação. Esses aspectos são apresentados com detalhes nos capítulos 6 e 7 desta tese.

CAPÍTULO

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

“I’ll call “Society of Mind” this scheme in which each mind is made of many smaller processes. These we’ll call agents. Each mental agent by itself can only do some simple thing that needs no mind or thought at all. Yet when we join these agents in societies – in certain very special ways – this leads to true intelligence.”

Marvin Minsky, 1985

2.1 AGENTES INTELIGENTES

2.1.1 Um Breve Histórico

Segundo Bradshaw (1997), a idéia de se utilizarem sistemas para o desenvolvimento de tarefas de maneira autônoma, com capacidade de interação com outros sistemas e com seres humanos, foi primeiramente proposta por John McCarthy, nos anos 1950. Tal sistema recebeu de Oliver G. Selfridge a denominação de agentes, alguns anos depois, quando este pesquisador trabalhava com McCarthy no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). A visão que se tinha naquele momento de um agente resumia-se a de um *soft robot*⁸ vivendo e atuando dentro do universo de um computador. O primeiro registro de implementação de um sistema de agentes, o *modelo de atores concorrentes*, desenvolvido por Hewitt, é datado de 1977 (WOOLDRIDGE; JENNINGS, 1995; NWANA, 1996; RODDY; DICKSON, 2000). Este modelo propôs o conceito de deliberação e interatividade entre objetos então denominados agentes, pelo encapsulamento de estados internos, passíveis de alteração em resposta a mensagens enviadas por objetos similares – outros agentes. Em seu modelo, Hewitt via um ator como um agente computacional que possuía um endereço e um comportamento. Os atores se comunicavam uns com os

⁸ O termo “*soft robot*” se refere a um software que atua analogicamente a um robô.

outros por meio de mensagens, desenvolvendo, de maneira assíncrona, ações desencadeadas por essas mensagens.

Surpreendentemente, a idéia de sistemas de agentes recebeu pouca atenção da comunidade científica até os anos 80 (WOOLDRIDGE; JENNINGS, 1995; MAES, 1995; JENNINGS; SYCARA; WOOLDRIDGE, 1998). Essa afirmativa é reforçada pelo apoio generalizado à proposição de Nwana (1996) para o início das pesquisas na área de agentes. Para este autor, o trabalho de Hewitt anteriormente citado deu início a uma das duas correntes de pesquisas com agentes existentes na atualidade. A primeira corrente está associada à Inteligência Artificial distribuída⁹, que se concentra na deliberação e nos modelos internos de raciocínio simbólico do agente. Ela vem contribuindo para a compreensão de macroaspectos do emprego de agentes, como interação, comunicação, decomposição e distribuição de tarefas, coordenação e cooperação, resolução de conflitos, etc. (BRADSHAW, 1997). Adicionalmente aos macroaspectos, a corrente explora assuntos relacionados à teoria de agentes, arquiteturas e linguagens (NWANA, 1996).

A segunda corrente teve seu início nos anos 90, e é considerada bastante polêmica, pois trata da tipologia e da taxionomia dos agentes. Nwana (1996) sugere que tal polêmica existe pelo fato de que, atualmente, qualquer sistema é classificado como agente, uma situação que é agravada pela proliferação, a partir de 1994, de agentes de diversos “tipos”, desencadeando uma verdadeira explosão na utilização do termo “agentes” (NWANA; NDUMU, 1999), sem que houvesse o devido consenso do que o termo realmente significa (BRADSHAW, 1997). Pesquisadores da área vêm propondo uma variedade de definições para agentes, cada um com a esperança de explicar o significado do termo para sua aplicação (FRANKLIN; GRAESSER, 1997), um fenômeno que pode ser em parte explicado pela tendência natural que o ser humano tem de classificar um objeto que possui percepção e reação a alterações do ambiente como agente (JENNINGS; SYCARA; WOOLDRIDGE, 1998). Esse assunto será abordado com maior profundidade no item 2.1.2 deste capítulo.

⁹ Distributed Artificial Intelligence (DAI).

Apesar da ausência de um consenso sobre o que é um agente e, por consequência, do que vem a ser um sistema baseado em agentes, existem diversos sistemas implementados e em funcionamento que utilizam, reconhecidamente, agentes. Tais aplicações emergem de áreas como controle de processos, sistemas de manufatura, controle de tráfego, gestão da informação, comércio eletrônico, telecomunicações, medicina, educação e lazer¹⁰ (JENNINGS; WOOLDRIDGE, 1998; JENNINGS; SYCARA; WOOLDRIDGE, 1998; OLIVEIRA; FISCHER; STEPANKOVA, 1999). É importante notar, contudo, que entre essas aplicações, os autores não mencionam a utilização de agentes em simulações, mesmo este sendo um importante campo de pesquisa, principalmente em relação ao estudo de sistemas complexos. Tal ausência evidencia uma lacuna existente entre as linhas de pesquisas orientadas à noção de *agência*¹¹ associada à ciência da computação e àquelas que utilizam a emergência de padrões complexos de comportamento, a partir da interação entre unidades independentes em um sistema, como nos Modelos Baseados em Agentes. Esta última linha vem sendo explorada, basicamente, por pesquisadores oriundos de outras áreas que não a da ciência da computação, como ciências sociais, economia, biologia, ecologia, etc., fato que talvez justifique a escassez de referências vinculando a teoria geral de agentes, oriunda da ciência da computação, às aplicações na área de modelos e simulações. Outra justificativa para esse fenômeno pode estar associada ao fato de que grande parte dos pesquisadores envolvidos com modelos e simulações sabe claramente o que busca em Modelos Baseados em Agentes, não participando da polêmica em torno da definição e das tipologias de agentes.

Os comentários acima podem induzir à falsa conclusão de que a linha de pesquisa na área de modelagem e simulações baseadas em agentes não passa de aplicação da teoria de agentes. Trata-se de uma falsa idéia, pois tal linha de pesquisa vem se desenvolvendo com a incorporação de teorias como adaptação, auto-organização e caos. As pesquisas e aplicações nesta área originam-se nos trabalhos de autômato

¹⁰ Um exemplo são os videogames.

¹¹ Considerando, neste caso, o desenvolvimento de atividades em sistemas computacionais com autonomia, uma das fortes noções associadas a agentes.

celular de John von Neumann e de cibernética de Norbert Wiener, nos anos 1940 e 1950. Ambos forneceram as bases para o desenvolvimento das pesquisas em vida artificial¹² (FERBER, 1999). Segundo Roddy e Dickson (2000), a teoria do autômato celular de von Neumann formou um conjunto consistente de conceitos e princípios relacionados à estrutura e organização de sistemas naturais e artificiais, do papel da linguagem e da informação em tais sistemas e dos seus mecanismos de controle e meios de programação.

O termo “vida artificial” é atribuído a Chris Langton e passou a ser empregado no final dos anos 80. O termo não está apenas associado a esse pesquisador. Em realidade, este se constitui na pessoa com maior expressão nessa área, tendo iniciado, junto ao *Santa Fe Institute*, em 1994, o projeto que desenvolve a plataforma *Swarm* para implementações de simulações baseadas em agentes (LANGTON, 2001). O projeto *Swarm*¹³ trata-se do maior êxito nessa área e serve de referência a novos estudos.

2.1.2 Definição

Embora haja diversas definições para agentes, a área tem se caracterizado pela flexibilidade no emprego do termo “agente”, fato que vem causando dúvidas sobre o que efetivamente caracteriza um agente e, principalmente, o que o diferencia de um software com características de funcionamento independente. Essa situação tem gerado controvérsia sobre quais são as características fundamentais necessárias a um agente para que ele seja enquadrado como tal. Jennings (2000) expressa em seu artigo “*On agent-based software engineering*”, mesmo após anos de reconhecido trabalho na área, um certo desconforto ao tentar defini-lo:

Definir e classificar um fenômeno é sempre uma tarefa repleta de dificuldades – sempre haverá objeções a definições elementares, argumentos de que pontos importantes foram desconsiderados, ou reclamações de que não há nada de novo. Essas observações são especialmente pertinentes se a entidade a ser definida é intangível e um fenômeno relativamente novo.

¹² Do inglês, *Artificial Life*, mais comumente conhecido pelo termo “A-Life”.

¹³ <http://www.swarm.org>.

Dois anos antes desse artigo, Jennings e Wooldridge (1998) mencionam as dificuldades enfrentadas ao tentar definir agentes pela ausência de conceitos-chave universalmente aceitos pela comunidade acadêmica. Bradshaw (1997) ironiza essa situação comentando que existem poucas similaridades entre os diferentes enfoques empregados no desenvolvimento de sistemas de agentes. Este autor crê que existe alguma feição familiar que é intuitivamente reconhecida entre eles. Bradshaw continua sua idéia com sarcasmo dizendo que, uma vez que esta feição familiar não está relacionada com a similaridade nos detalhes de implementação, arquitetura ou teoria, ela ocorre em função dos olhos de quem observa. Ou seja, a distinção é fruto das expectativas e pontos de vista de cada pessoa. Um agente inteligente para uma pessoa pode vir a ser um objeto com autonomia para outra, e assim por diante.

Nwana (1996) concorda em parte com essa visão ao considerar que o termo “agente” funciona como um guarda-chuva, acomodando sob sua cobertura um grupo heterogêneo de pesquisa e desenvolvimento (motivo para que visões diferentes do que vem a ser um agente dificultem sua definição). Hermans (1996) inicia o item relacionado à definição de agentes, em sua tese de doutorado, dizendo que não irá fornecer uma sólida definição de agentes, pois, pela multiplicidade de papéis que um agente pode desempenhar, essa tarefa é quase impossível e nada prática. Como resultado da ausência de uma definição universalmente aceita, surgem “sinônimos” associados aos diferentes grupos de pesquisa e desenvolvimento. Entre esses “sinônimos”, pode-se citar os *knowbots (knowledge-based robots)*, *softbots (software robot)*, *taskbots (task-based robots)*, *userbots*, *robots*, *personal agents*, *autonomous agents*, *mobile agents*, *personal assistants*, etc. (NWANA, 1996). Porém, em suas observações, Hermans (1996) não deixa clara sua posição em relação à invenção de tais sinônimos, nem se estes colaboram ou tumultuam ainda mais o perturbado e confuso cenário em torno da definição de agentes.

O artigo de Franklin e Graesser (1997) intitulado “*Is it an Agent, or just a Program? A Taxonomy for Autonomous Agents*” apresenta um considerável estudo sobre as

diferentes definições para o termo “agente”¹⁴, e as aplicações em que estes são utilizados. Esses autores buscaram características comuns que pudessem servir de base para uma definição comum, formulando a seguinte definição:

Um agente autônomo é um sistema situado dentro de um ambiente, como um de seus componentes, podendo sentir e atuar sobre ele ao longo do tempo, e na busca de sua agenda, de modo a afetar o que ele sentirá no futuro¹⁵.

Por essa definição apresentar os atributos considerados necessários a aplicações de agentes em modelagem e simulações, ou seja, percepção, autonomia, mobilidade e adaptabilidade, ela é a definição adotada nesta tese. Contudo, deve ser acrescentado à definição o atributo sociabilidade.

2.1.3 Atributos

Hayes-Roth (1995) sugere que um agente apresenta três funções básicas: percepção das condições (dinâmicas) do ambiente; racionalização dos atributos/parâmetros ambientais por ele considerados; e ação, como fruto da racionalização. O emprego dessas funções exige o reconhecimento da existência de atributos básicos que um agente deve possuir para ser considerado como tal. A inclusão de outros atributos contempla o agente com características desejáveis em casos específicos. Contudo, sua inexistência não o desclassifica como agente. Percepção e autonomia são atributos básicos, enquanto mobilidade, sociabilidade e adaptabilidade enquadram-se como atributos secundários.

Nesta seção, esses cinco atributos são resumidamente apresentados, por serem considerados os mais importantes para simulações baseadas em agentes.

¹⁴ A lista de definições de agentes empregadas por Franklin e Graesser (1997) para a proposta de definição é apresentada no Anexo A deste documento.

¹⁵ Tradução e adaptação da definição proposta por Franklin e Graesser (1997): “An autonomous agent is a system situated within and a part of an environment that senses that environment and acts on it, over time, in pursuit of its own agenda and so as to effect what it senses in the future”.

a) Percepção

Um agente deve ter a habilidade de perceber¹⁶ o ambiente à sua volta, e a presença de outros agentes, de modo a interagir com eles e a agir em busca de suas metas, de acordo com suas regras de comportamento.

b) Autonomia

Consiste na capacidade de um agente de agir sem a intervenção direta do ser humano ou de outros agentes, enquanto mantém controle sobre suas ações e estados internos (JENNINGS; WOOLDRIDGE, 1998). Em outras palavras, um agente pode ter um comportamento próprio e agir com independência em resposta à interação com outros agentes, ou à alteração do ambiente em que vive. Essa capacidade é possível graças à existência de uma base de conhecimento própria para cada agente, a qual codifica seu comportamento.

c) Mobilidade

Para Bradshaw (1997), mobilidade é a capacidade de um agente de migrar de um sistema, ou plataforma, para outro. Adaptando esse conceito para a simulação baseada em agentes, representa a capacidade do agente de se mover no ambiente em que vive, de modo a cumprir com sua agenda.

d) Adaptabilidade

Trata-se da capacidade de aprendizado e desenvolvimento a partir de experiências (BRADSHAW, 1997), evoluindo para novas regras de comportamento. Apesar de desejável em uma simulação, a implementação de mecanismos evolucionários para aprendizado ainda é bastante restrita. Contudo, os próximos avanços na aplicação de simulações baseadas em agentes deverão ocorrer nessa linha de desenvolvimento.

¹⁶ O termo “percepção”, conforme empregado neste trabalho, é definido na nota de rodapé número 4.

e) Sociabilidade

É a capacidade de interação com outros agentes. Essa interação pode ocorrer por meio de colaboração e concorrência (JENNINGS; WOOLDRIDGE, 1998). Entre os tipos de interação em uma simulação, pode-se citar a troca de informações entre diferentes agentes, ou mecanismos de segregação.

2.2 SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES

2.2.1 O Paradigma de Agentes em Simulações

O desenvolvimento de simulações que empregam o paradigma de Agentes Inteligentes deve ser visto como a implementação de um software qualquer. Essa afirmativa incorpora ao universo de modelos e simulações dois aspectos importantes do planejamento e implementação de um software: abstração e modularidade. Diversos autores (NWANA, 1996; BRADSHAW, 1997; JENNINGS; WOOLDRIDGE, 1998; JENNINGS; SYCARA; WOOLDRIDGE, 1998; NWANA; NDUMU, 1999; JENNINGS; WOOLDRIDGE, 2002) consideram esses dois aspectos como as ferramentas mais poderosas para se lidar com sistemas complexos. Para esses autores, se o domínio do problema é particularmente complexo, amplo, ou imprevisível, possivelmente a única maneira de lidar razoavelmente com ele consiste em quebrá-lo em pequenas partes ou módulos. É natural, portanto, que esse enfoque empregue agentes para lidar com cada módulo, de maneira independente.

Ao combinar a modularização com agentes orientados à execução das tarefas de cada módulo, o programador se vê diante de uma sociedade de agentes, que interagem e colaboram entre si, na busca de suas metas. Visualizar o funcionamento de um software como tal habilita o emprego de diferentes níveis de abstração e descentralização na execução de tarefas, o que só é possível graças à autonomia e à sociabilidade de que os agentes desfrutam (WOOLDRIDGE; JENNINGS; KINNY, 2000). Num sistema como esse, todos os agentes estão continuamente ativos, sendo a coordenação derivada da interação entre diferentes agentes no sentido *bottom-up* de abstração (JENNINGS, 2000). Ou seja, a coordenação é uma

propriedade que emerge no sistema como resultado da interação dos agentes no nível mais elementar de abstração e através dos níveis que compõem o sistema.

A aplicação do paradigma de Agentes Inteligentes em simulações se baseia na característica acima, isto é, na criação de sociedades artificiais, formadas por agentes que interagem entre si, em nível elementar (ou microscópico), e com a emergência de padrões de comportamento mais complexos para o sistema (nível macroscópico). Esses padrões são, por exemplo, o comportamento de sociedades, mercados econômicos e sistemas naturais, analisados em cenários caóticos e imprevisíveis (PANEPENTO, 2000). Janssen e de Vries (1998) denominam a observação desses padrões de “*Computerrarium*”, um termo bastante apropriado ao conceito empregado nesse tipo de simulação.

2.2.2 Propriedades

A aplicação do paradigma de agentes em simulações encontra suporte em três propriedades elementares: caráter exploratório, abstração do comportamento de agentes e propriedades emergentes.

a) Caráter Exploratório

A escolha do paradigma de modelagem baseada em agentes implica a adoção de metodologia, técnicas e ferramentas que estão largamente em construção (TERNA, 1998; BOX, 2000). Se as bases desse tipo simulação ainda não se encontram consolidadas, por que, então, adotá-la? Para Hood (2000), a explicação para o interesse nessa área reside no potencial exploratório que modelos baseados em agentes possuem. Nesse sentido, Tillman *et al.* (1999), ao apresentarem seu modelo para estudo de comportamento de atores em um sistema de suprimento de água, na Suíça, enfatizam a necessidade de compreensão do funcionamento do sistema:

Nós escolhemos um enfoque de modelagem que ampliasse nossa compreensão do sistema em observação. O objetivo principal não consiste na representação mais acurada do mundo real, mas em enriquecer nossa compreensão do comportamento fundamental dos atores [...].

A mesma justificativa é encontrada no desenvolvimento do *SWarrior*¹⁷, pelo Centro de Levantamento Estratégico¹⁸ dos Estados Unidos (SAC, 1999). Nessa aplicação, agentes são empregados para estudos associados a conceitos operacionais de guerra, representando campanhas militares. O objetivo principal desse sistema de simulação foi oferecer uma nova perspectiva para a compreensão das operações, visando à evolução das estratégias de guerra. Ainda em relação à aplicação na área militar, Young (2000) argumenta que o emprego de modelos e simulações com agentes na Força Aérea Americana possibilita a economia de milhões de dólares pela substituição de equipamentos e pessoal por agentes, em manobras virtuais que visam aprimorar procedimentos de ação.

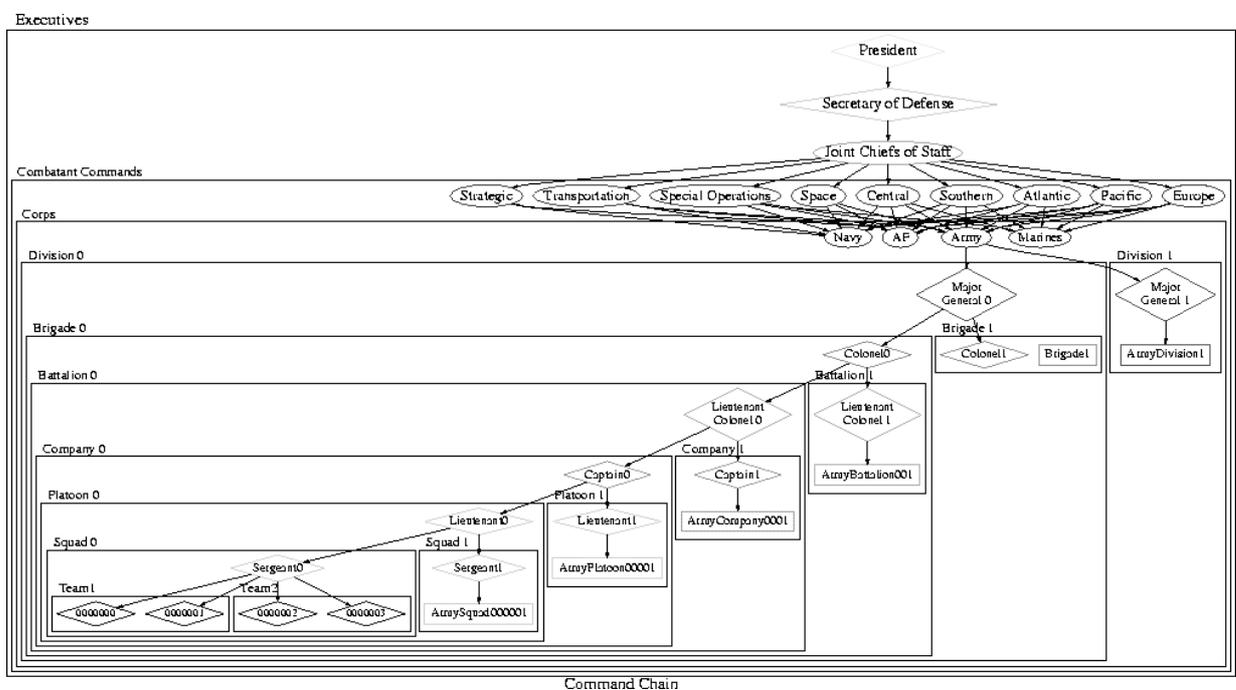


Figura 2. Exemplo de aplicação de agentes na área militar (DANIELS, 2000). No esquema, a linha de comando e de ação encontra-se subdividida em diferentes níveis (time, esquadrão, etc.), cada qual constituído por um grupo de agentes que interagem de acordo com o comportamento esperado na linha hierárquica.

Daniels (2000) apresenta uma simulação para análise do sistema de defesa dos Estados Unidos que emprega a modularização na exploração do tema (Figura 2).

¹⁷ SWARM Marine Infantry Combat Model.

¹⁸ Strategic Assessment Center, USA.

Cada nível é formado por indivíduos que, direta ou indiretamente, contribuem em termos de operacionalização das ordens passadas a partir de níveis superiores. Partindo da premissa de que o êxito de uma decisão estratégica formulada nos níveis mais altos depende da perfeita coordenação entre os diferentes níveis e, em cada nível, entre os indivíduos que o constituem, a simulação foi desenvolvida por etapas, considerando cada nível de modo independente. Eventualmente, os níveis foram integrados numa única simulação.

O caráter exploratório defendido pelos autores acima surge da possibilidade de se decompor ou quebrar um problema em módulos, conforme apresentado no item 2.2.1. Isso proporciona que o tema de estudo seja gradualmente trabalhado. A modularidade na simulação permite que diferentes aspectos sejam abordados isoladamente, para posterior combinação. A importância dessa possibilidade é maior quando combinada às demais propriedades, principalmente à abstração de comportamentos e à facilidade de incorporar novos elementos à simulação, propriedades estas empregadas no exemplo oferecido por Daniels (2000).

Um outro exemplo de aplicação de simulações baseadas em agentes para estudos exploratórios é descrito por Kohler (1998) e Kohler *et al.* (1998). Os autores empregam agentes na área de arqueologia, visando testar as hipóteses sobre a evolução de uma vila, através da interação entre o ser humano (organização social) e o meio ambiente. Nesses trabalhos, Kohler e os demais autores reconhecem o emprego de agentes como um novo enfoque, situado entre a formulação de teorias e a experimentação, uma interface bastante importante para estudos que trabalham com deduções de comportamento e funcionamento de sociedades, a partir de evidências deixadas por civilizações passadas. Esse emprego sugere uma segunda linha do caráter exploratório, que é a da exploração de hipóteses, e seu teste. Nesse caso, o que se busca é uma coerência entre o comportamento deduzido e as evidências existentes. A utilização dessa propriedade, sob esse enfoque, não se restringe apenas à arqueologia. Ela vem sendo empregada em estudos que partem de hipóteses sobre o comportamento de elementos de um sistema qualquer. Em realidade, grande parte dos avanços na área de simulações baseadas em agentes tem sua origem em estudos econômicos. A aplicação nessa área vem ocorrendo em

tal proporção que recebeu uma denominação específica: *agent-based computational economics* (ACE)¹⁹ (TESFATSION, 2001; TEFATSION, 2002).

b) Abstração do Comportamento de Agentes

O ser humano sempre usou modelos²⁰ como uma simplificação da realidade para uma melhor compreensão dela, ou para a resolução de problemas. Portanto, é importante que um modelo capture os elementos e características essenciais ao contexto da realidade ou do problema (JØRGENSEN, 1994; WOOLFSON; PERT, 1999). Ford (1999) aprofunda essa idéia argumentando que modelos informais são utilizados a todo o momento pelo homem. As imagens presentes no pensamento humano correspondem a representações simplificadas de sistemas complexos, freqüentemente denominadas de *mapa mental*. Esse *mapa mental* é descrito como uma concepção grosseira, uma generalização da realidade, que influencia o modo como cada indivíduo entende o mundo e, conseqüentemente, como deve se relacionar com ele (SENGE, 1990 *apud* FORD, 1999). Assim, o mesmo mundo real pode ser visto, ou conceitualizado, de diferentes maneiras, de acordo com os interesses de cada um (GRANT; PEDERSEN; MARIN, 1997).

A simulação baseada em agentes é caracterizada pela existência de diversos agentes que interagem autonomamente entre si, num ambiente artificial, com pouca ou nenhuma forma de coordenação central (AXELROD, 1997). Esse *modus operandi* é fruto de um novo enfoque para análise de sistemas, baseado na modelagem do comportamento de cada elemento individualmente, ou seja, na codificação de comportamentos para cada agente, que representa um elemento do sistema, o qual possui uma agenda específica de atividades. A característica acima descrita se contrapõe à visão clássica da análise de sistemas e da modelagem numérica, que se baseiam, primariamente, na identificação de elementos de um sistema, nos relacionamentos existentes entre estes elementos e na quantificação dos processos que entre eles ocorrem (JØRGENSEN, 1994; GRANT; PEDERSEN;

¹⁹ Site da ACE: <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/ace.htm>.

²⁰ Os primeiros modelos documentados são as inscrições nas paredes de cavernas, relatando o "modelo" de vida de povos antigos.

MARIN, 1997; CHRISTOFOLETTI,1999; FORD, 1999; WOOLFSON; PERT, 1999), conforme ilustrado na Figura 3. Nessa figura, encontra-se apresentado um modelo conceitual para estudo ecotoxicológico, um *mapa mental* no qual cada seta representa uma relação (ou processo) que, eventualmente, na implementação do modelo, será traduzida por uma equação matemática.

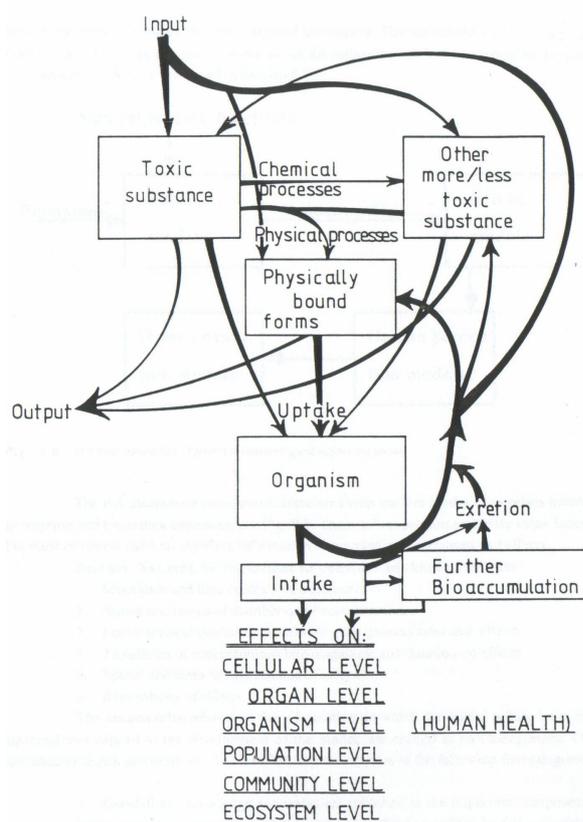


Figura 3. Exemplo de modelo conceitual com ênfase nos processos - setas (JØRGENSEN, 1994).

Apesar das diferenças de enfoque, o emprego da análise de sistemas, com pequenas alterações, pode ser feito na modelagem de agentes. A delimitação de um sistema se aplica integralmente em simulações baseadas em agentes. O mesmo ocorre com a identificação dos elementos. Já a idéia dos processos existentes entre os elementos exige uma dramática mudança de paradigma. O interesse na quantificação desses processos é deixado de lado, em favor do estudo do comportamento de cada elemento (Figura 4).

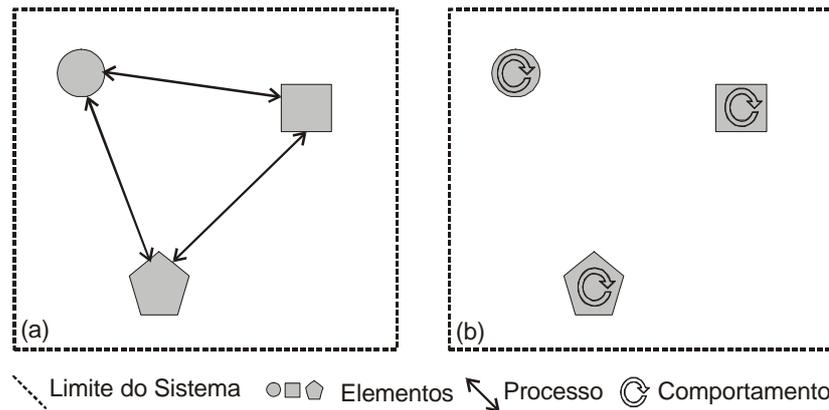


Figura 4. (a) Análise de sistemas para modelagem numérica, com ênfase nos processos (setas); e (b) para modelagem baseada em agentes, com ênfase no comportamento dos elementos (setas).

A modelagem do comportamento de agentes tem, usualmente, origem na observação de um sistema real²¹. A abstração do comportamento de cada elemento do sistema pode empregar um ou mais critérios (atributos) associados aos recursos (naturais ou não), história, sociedade, situação espacial, etc. (JANSSEN; DE VRIES, 1998; ROUCHIER *et al.*, 2001). Terna (1998) argumenta que o primeiro passo na implementação de um “experimento” com agentes reside na tradução do mundo real, foco do problema, em um conjunto de agentes e regras de comportamento que juntos irão compor eventos em uma simulação. O *mapa mental* anteriormente apresentado servirá, então, de base para a identificação do comportamento de cada indivíduo, segundo sua percepção e interesses (necessidades), em contrapartida à identificação de elementos e processos na modelagem clássica. Assim, grande parte dos esforços para o desenvolvimento de simulações baseadas em agentes consiste em fazer que o comportamento de cada agente se aproxime do comportamento real, por meio de regras simples, num processo de abstração de comportamento (Figura 5).

²¹ Em alguns casos, a abstração do comportamento pode ser obtida com evidências e não diretamente de observação, como apresentado no item 2.3.2, subitem “a”, para estudos antropológicos.

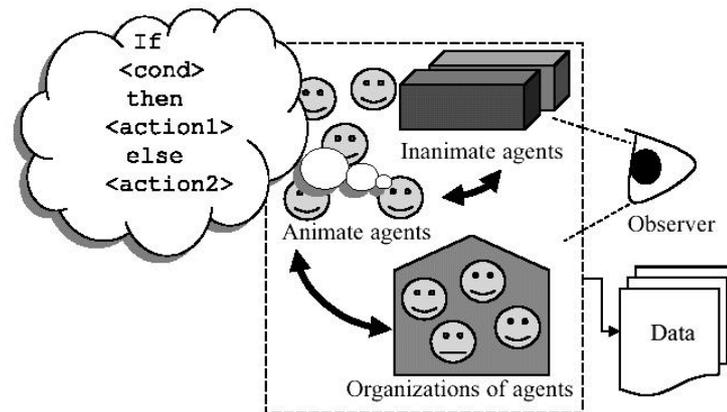


Figura 5. Abstração de comportamento de agentes a partir da observação do mundo real, e sua codificação em regras de comportamento (JOHNSON; LANCASTER, 2000).

Diante do potencial oferecido pelas simulações baseadas em agentes para lidar com o comportamento de cada elemento (ou grupo de elementos) do sistema, é importante considerar que a abstração do comportamento pode ser feita com o uso de regras heurísticas. Pritchard e Sanderson (1999) apresentam essa possibilidade como uma convidativa oportunidade para estudos de sistemas complexos. Esses autores se referem à abstração de comportamentos e realidade como caricaturas desta. Nesse sentido, uma caricatura deve ser vista como um *mapa mental* no qual algumas feições encontram-se propositalmente exageradas para efeito de melhor compreensão do comportamento. Em outras palavras, é dada ênfase a itens de maior relevância, segundo a percepção do modelador (Figura 6). Nesse ponto, a abstração do comportamento se aproxima do caráter exploratório descrito no subitem “a”. Ou seja, o observador poderá apresentar viés ou mesmo estar errado ao codificar regras de comportamento, condições que poderão ser evidenciadas no desenvolvimento da simulação. Por conseqüência, ele terá chances de alterar sua percepção e racionalização sobre o papel dos elementos do sistema.

c) *Propriedades Emergentes*

Um sistema complexo pode ser qualquer sistema que possua um grande número de componentes interagindo entre si, cujo agregado total de suas atividades é não-linear (ROCHA, 1999). Segundo Edmonds (1999), a teoria da complexidade é encarada como um paradigma associado ao holismo, o que significa dizer que um sistema complexo não apresenta significado em um enfoque reducionista,

newtoniano. Essa afirmação encontra suporte, por exemplo, no funcionamento não-linear dos sistemas complexos, como os sistemas ecológicos, de difícil representação numérica. Rocha (1999) e Parrott e Kok (2000) completam essa idéia sugerindo que a definição acima pode ser aplicada a um amplo espectro de disciplinas científicas. Desse modo, o estudo da complexidade é, por natureza, multidisciplinar, e pode ser facilmente entendido pelo ditado: “o todo é maior que a soma das partes” (DECKER, 1997; MOROWITZ, 1998; ROCHA, 1999; FONTANA; BALLATI, 1999; PARROTT; KOK, 2000).

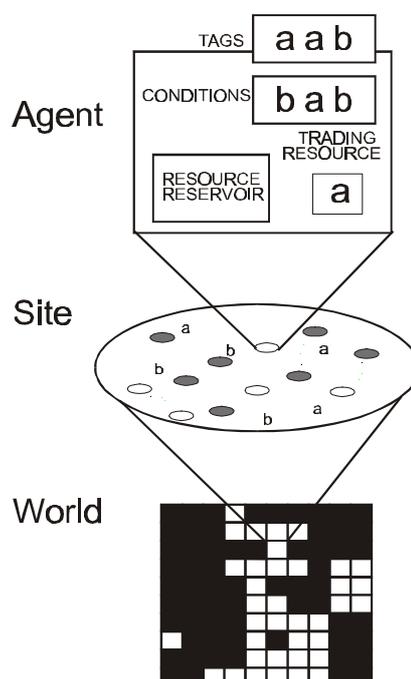


Figura 6. Exemplo aplicado ao estudo de uma assembléia comunitária para negociação sobre usos de recursos naturais. Nesse modelo, o comportamento e as necessidades do agente influenciam na decisão sobre a utilização do recurso a ou b num determinado local (site). A negociação de interesses resulta na representação de usos para o mundo virtual (HRABER; MILNE, 1997).

A teoria da complexidade²² considera que a maneira mais efetiva de evolução de um sistema ocorre por meio de interações entre seus elementos. Isso equivale a dizer

²² Foge ao escopo desta tese uma discussão mais aprofundada sobre caos e complexidade, bastando apenas o reconhecimento de que a aplicação de simulações baseadas em agentes vem se mostrando como uma promissora alternativa para lidar com ambos os conceitos.

que as interações são responsáveis pelo surgimento de propriedades e padrões de comportamento que não eram previstos (ou mapeados) para o sistema, antes de ocorrerem tais interações (PARROTT; KOK, 2000). Essas propriedades são denominadas *propriedades emergentes* (STANDISH, 2001) e representam o potencial mais importante da modelagem baseada em agentes. Box (2000) considera a emergência de padrões complexos de comportamento, a partir de regras bastante simples, um dos avanços mais excitantes na área de estudos de sistemas, que garante uma verdadeira revolução na área de simulações. Lissack (1999) define as propriedades emergentes como:

[...] um comportamento geral do sistema que é obtido a partir da interação de muitos participantes – um comportamento que não pode ser previsto ou visualizado a partir do conhecimento do que o componente do sistema faz isoladamente.

Axelrod (1997) observa que a complexidade dos modelos baseados em agentes deve ocorrer nos resultados da simulação e não no que se assume sobre a realidade. Ou seja, o modelador tem conhecimento detalhado dos atributos e propriedades de cada agente, sendo geralmente incapaz de prever, ou conhecer, as propriedades do sistema sem que o modelo seja executado (HOOD, 2000).

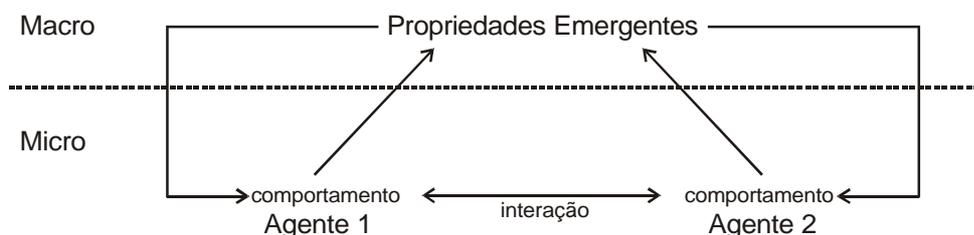


Figura 7. Abstração de um sistema em nível micro, em que elementos interagem a partir da modelagem de seus comportamentos, e a conseqüente emergência de padrões de comportamento e propriedades mais complexas em nível macro.

O termo “propriedades emergentes”, também conhecido como auto-organização²³ (MARCENAC, 1996; COMMON; NEUMANN, 2000; CHARTERIS, 2001), deve ser entendido a partir da representação de um sistema em diferentes níveis de

²³ Do inglês “self-organization”. Embora estes termos venham sendo tratados como sinônimos, na realidade, a auto-organização é uma propriedade dos sistemas complexos, assim como o caos.

abstração. No nível mais elementar (microscópico), ações e interações entre os elementos (agentes) ocorrem e geram comportamentos complexos nos níveis mais elevados (macroscópicos). Ou seja, interações no nível micro produzem estruturas no nível macro, que por sua vez afetam as interações no micro, e assim por diante, conforme ilustrado pela Figura 7. Em termos operacionais, modelar um sistema a partir de suas unidades elementares requer o enfoque *bottom-up* (AXTELL; EPSTEIN, 1999; MACY; WILLER, 2001; TESFATSION, 2002), e não o tradicional enfoque *top-down*, bastante comum em modelos numéricos.

2.2.3 Aplicações

Para apresentar o estado da arte dos MBA, este item foi subdividido em estudos gerais, compreendendo aplicações em diversas áreas de conhecimento, e em estudos especializados. Este segundo item apresenta maior relevância ao tema desta tese, pois trata de aplicações que buscam associar padrões de comportamento à utilização e ocupação do espaço. Aparentemente, muito do que se tem feito nessa linha de pesquisa tem suas origens na necessidade de se associarem Sistemas Geográficos de Informação a novos paradigmas de simulação, como autômato celular e MBA.

a) Estudos Gerais

A aplicação de modelos baseados em agentes em estudos ambientais é escassa, especialmente se comparada ao volume de aplicações em economia, ciências sociais e antropologia. Em qualquer uma destas linhas, merece destaque o *Santa Fe Institute*²⁴, Novo México, pelo consistente trabalho que vem sendo conduzido na área de sistemas complexos. É de lá que surgiram os principais trabalhos em modelagem baseada em agentes, incluindo a mais conhecida plataforma *freeware* de desenvolvimento, o SWARM²⁵, referência para qualquer pesquisador desse novo ramo de pesquisa.

²⁴ <http://www.santafe.edu/>.

²⁵ <http://www.swarm.org/>.

Provavelmente, o pesquisador que mais se destaca na aplicação do paradigma de Agentes Inteligentes em estudos ambientais seja Gimblett. Os primeiros ensaios deste autor datam do início da década de 90, com aplicações na área de celular autômato e propriedades emergentes (BALL; GIMBLETT, 1992; DEADMAN, BROWN; GIMBLETT, 1993). Nos trabalhos subseqüentes, Gimblett passou a se dedicar a aplicações de Inteligência Artificial em gerenciamento ambiental. Nessa linha, em 1994, o pesquisador publicou três importantes trabalhos (dois deles em co-autoria): *Virtual Ecosystems* (GIMBLETT, 1994); *The Role of Goal-Oriented Autonomous Agents in Modeling People-Environment Interactions in Forest Recreation* (DEADMAN; GIMBLETT, 1994); e o prefácio da edição sobre *Object-Oriented Modelling of Natural and Artificial Agents in Ecosystem and Natural Resource Management* do *Mathematical and Computer Modelling Journal* (SAARENMAA; GIMBLETT, 1994). Esses trabalhos abriram as portas para aplicações de MBA na área de planejamento da paisagem e uso de recursos naturais pelo ser humano. Gimblett vem, desde então, concentrando seus esforços no estudo do impacto causado por turistas em parques ecológicos (GIMBLETT; DURNOTA; ITAMI, 1997; GIMBLETT; DURNOTA; ITAMI, 1997b; GIMBLETT, 1997; GIMBLETT, 1998; GIMBLETT; ITAMI, 1997; GIMBLETT; RICHARDS; ITAMI, 1998; GIMBLETT; DANIEL; ROBERTS, 2000; DEADMAN; SCHLAGER; GIMBLETT, 2000; ITAMI *et al.*, 2000).

Com menos trabalhos, porém com grande impacto na consolidação de MBA, merecem destaque Epstein e Axtell. A simulação *sugarscape* (EPSTEIN; AXTELL, 1996) conta com agentes que constituem uma população com distribuição espacial e que desenvolvem atividade agrícola (plantio de cana-de-açúcar), estruturada por classes sociais e atividade econômica associada. Nesse modelo os agentes se locomovem para ganhar acesso aos recursos essenciais à sua sobrevivência e reprodução, organizando-se em sociedades que desenvolvem atividades de comércio. Esse trabalho serve de referência a diversos pesquisadores, como base para a inclusão de novos enfoques e ingredientes ao *sugarscape*²⁶. Menção especial

²⁶ Uma busca realizada no site do Santa Fe Institute listou 22 desses artigos que usam como base o trabalho de Epstein e Axtell.

deve ser feita ao trabalho de Common e Neumann (2000), que testa elementos de sustentabilidade dos recursos, e uso racional destes por parte dos agentes. A influência do *sugarscape* na consolidação de MBA é argumentada por Terna (2001). Neste trabalho, Terna conduz uma breve revisão sobre os avanços dos MBA, tendo como pano de fundo o *sugarscape*. Esse autor salienta a necessidade de formalização e sistematização dos trabalhos nessa área, de forma a permitir a reprodução de experimentos e a comparação entre resultados.

Apesar de esses trabalhos não estarem diretamente orientados para estudos do meio ambiente natural, eles enfocam, com bastante propriedade, a relação entre elementos sociais e, em alguns momentos, com recursos naturais. Ainda na linha do *sugarscape*, porém com orientação a estudos antropológicos e arqueológicos, encontram-se os trabalhos de Kohler (KOHLE, 1998; KOHLE *et al.*, 1998). Esses trabalhos simulam a organização de vilas pré-históricas nos Estados Unidos. Utilizando como plataforma de desenvolvimento o SWARM, as simulações tratam da dinâmica e evolução de comunidades indígenas em resposta à alteração dos recursos disponíveis e à presença de outros povos. Esses trabalhos possuem estreita relação com o trabalho de Common e Neumann (2000), porém com maior ênfase na relação entre os diferentes povos.

Janssen e Carpenter (1999) abordam a questão da informação e do aprendizado na manutenção da resiliência de lagos, uma vez que cada indivíduo, isoladamente, contribui para a degradação do ambiente. Sanders *et al.* (1997) deixam de lado a questão dos recursos e concentram-se nos processos de evolução inerentes ao povoamento de uma região. A hipótese central é a de que existe uma hierarquização no processo de povoamento que ocorre tanto em tempo quanto em espaço. Esse processo é fruto de regras simples de comportamento. Esses autores testam as respostas dessa hierarquia ante perturbações no ambiente.

Diversos modelos tratam de problemas associados à *Tragédia dos Comuns*²⁷, e ao uso irracional de recursos, quaisquer que sejam eles, em diferentes sociedades ou situações. Nesse enfoque enquadram-se trabalhos orientados a questões de sustentabilidade dos recursos naturais. Turner (1993) abordou de maneira elementar a *Tragédia dos Comuns* na utilização de sistemas distribuídos. Na área ambiental, Deadman simula o processo de declínio de recursos em função de padrões insustentáveis de utilização (DEADMAN, 1999) e propõe experimentos de gerenciamento para evitar esse problema (DEADMAN; SCHLAGER; GIMBLETT, 2000). Trabalhos associados à questão política e econômica do gerenciamento de recursos foram propostos por Antona *et al.* (1998), Carpenter, Brock e Hanson (1999), Jager *et al.* (2000) e Sieg (2001). Também existem trabalhos com enfoque social na *Tragédia dos Comuns*, como Hraber e Milne (1997), Tillman *et al.* (1999), Davis (2000) e Thébaud e Locatelli (2001).

As ciências sociais vêm se mostrando um campo fértil para o avanço de MBA. O reconhecimento do potencial oferecido pelo paradigma de modelagem baseada em agentes é tal que gerou, a partir de 1998, uma publicação especializada no assunto, o *Journal of Artificial Societies and Social Simulation – JASSS*²⁸. Atualmente, esse periódico encontra-se em seu quinto volume, contando com mais de cem artigos disponíveis on-line sobre o assunto. Mesmo com a existência de um veículo de comunicação como o JASSS, as publicações não se restringem a ele. São diversas as áreas e enfoques de MBA em ciências sociais. Vega-Redondo (2000) apresenta um estudo sobre hierarquia social, com base em regras custo–benefício, para avaliar ganhos profissionais. Um outro trabalho nessa linha é o de Conte (2000), que analisa estratégias para formação de parcerias entre indivíduos em empresas. Numa linha mais ligada à sociologia, White (1999) desenvolve um modelo para estudos de comportamentos matrimoniais nas culturas tradicionais da Índia, Indonésia e Sri

²⁷ Garrett Hardin (1968) defendeu a idéia de que os recursos comuns poderiam ser utilizados por qualquer pessoa que pudesse declarar seus direitos de utilizá-los. Assim, com o crescimento populacional haveria também um aumento na pressão sobre os recursos finitos que são compartilhados localmente, ou mesmo em âmbito global (e.g., estoque pesqueiro), com a inevitável superexploração e ruína dos recursos. A este processo Hardin denominou *Tragédia do Comuns*.

²⁸ <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/jasss.html>.

Lanka. Axtell e Epstein (1999) desenvolvem estudos relacionados ao processo de aposentadoria. Nesse artigo, os autores exploram a idéia de que uma pequena fração da população escolhe o momento da aposentadoria. Para eles, a grande maioria das pessoas é influenciada pela tendência geral da comunidade, num processo de imitação.

A área da economia presencia atmosfera semelhante a das ciências sociais em relação ao MBA, ou seja, existe uma aura positiva em relação ao potencial oferecido por esse paradigma. Duffy (2001) desenvolve uma simulação orientada ao aprendizado de mercados especulativos. Outros trabalhos na linha de mercados lidam com assuntos como flutuações de mercado (CASTIGLIONE, 2000; MANSILLA, 2000); mercado de *comodities* (ARNHEITER, 2000; IBA; TAKENAKA; TAKEFUJI, 1998); e mercados artificiais (ISHINISHI; NAMATAME, 1999; TESHATSION, 2001b). Outras linhas de pesquisa atuam, por exemplo, nos efeitos da economia mundial sobre a qualidade ambiental, como o trabalho de Janssen e Vries (1998), que lida com o aquecimento global.

Uma linha de pesquisa é desenvolvida em estudos relacionados ao planejamento e controle de tráfego (EROL; LEVY; WENTWORTH, 2000; MANIKONDA *et al.*, 2000; The SOCIAT Project: Simulation of Social Agents in Traffic²⁹) e conta com um considerável material sobre o assunto.

b) Estudos Especializados

Um agente espacial é um agente inteligente que possui a habilidade de racionalizar representações do espaço, desenvolvendo tarefas preestabelecidas (RODRIGUES; RAPER, 1998; RODRIGUES; RAPER, 1998b; RODRIGUES, RAPER; CAPITÃO, 1998; RODRIGUES *et al.*, 1997; RODRIGUES *et al.*, 1998). Apesar de esta ser uma definição bastante subjetiva, ela captura o sentido essencial de um agente em simulações espacializadas, qual seja, a habilidade de enxergar o espaço e inferir informações sobre ele, a partir de uma base de conhecimento própria. O emprego de

²⁹ Projeto que vem sendo desenvolvido numa parceria entre a UFRGS e a Gerhard-Mercator-University (<http://www.inf.ufrgs.br/~bazzan/sociat.html>).

autômato celular³⁰ no espaço foi precursor da aplicação de MBA em estudos associados a sistemas geográficos. Um sistema geográfico, segundo Dibble (2000), consiste de qualquer estrutura presente na paisagem, seja ela natural ou antrópica. O estudo desses sistemas tem sido conduzido com o emprego de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Num SIG, um sistema geográfico tem sua complexidade reduzida pela representação dos atributos espaciais em diferentes mapas temáticos. Ou seja, simplifica-se a realidade, com bases nos atributos espaciais mais importantes. Essa simplificação, somada ao potencial oferecido pela representação matricial do espaço (*grid*), e as operações de análise espacial presentes num SIG justificam a aproximação do MBA com estes e, por conseqüência, com a realidade oferecida por esses mapas temáticos (GIMBLETT; DURNOTA; ITAMI, 1997b).

A definição anteriormente apresentada se aplica perfeitamente ao trabalho de Ferrand (1996). Este autor parte do princípio de que o planejamento espacial (crescimento urbano, zoneamento, etc.) encontra-se totalmente dependente do contexto social e de que, ao desconsiderar essa dependência, qualquer plano está fadado à falha. O modelo de Ferrand considera a participação de diversos atores no processo de planejamento, cada qual representado por um agente, com percepções e necessidades que influenciam o processo. Nessa área de planejamento espacial e crescimento urbano, enquadra-se o trabalho de Benenson (1998). Este autor estuda a dinâmica populacional em bairros residenciais, em função da disponibilidade de infra-estrutura e valor imobiliário. Rouchier *et al.* (2001) desenvolveram um modelo similar, porém em escala regional, para estudo dos movimentos migratórios de povos nômades em Camarões. Nesse sistema, a busca por qualidade de vida é a força motriz dos agentes, que atuam com diferentes princípios de racionalidade.

Recentemente, Otter, Veen e Vriend (2001) publicaram um artigo apresentando ABLOM (*Agent-Based Location Model*). Nesse sistema é simulado o mecanismo de decisão de dois grupos de agentes, que representam firmas e residências. Esses

³⁰ Existe uma tênue diferença entre autômato celular e agente. Box (2000) descreve o funcionamento de um autômato, representado por uma célula de uma matriz, que tem seu estado afetado pelas células de sua vizinhança. A questão básica é: um agente parado é um autômato?

dois grupos interagem entre si, com o ambiente e com as propriedades emergentes do sistema, o que possibilita o reconhecimento dos mecanismos básicos que regem a ocupação do solo e a formação de padrões de ocupação do espaço. Esse modelo inclui aspectos relacionados à teoria econômica, complexidade e decisão, e propõe o estudo do comportamento em nível micro, num contexto espacial.

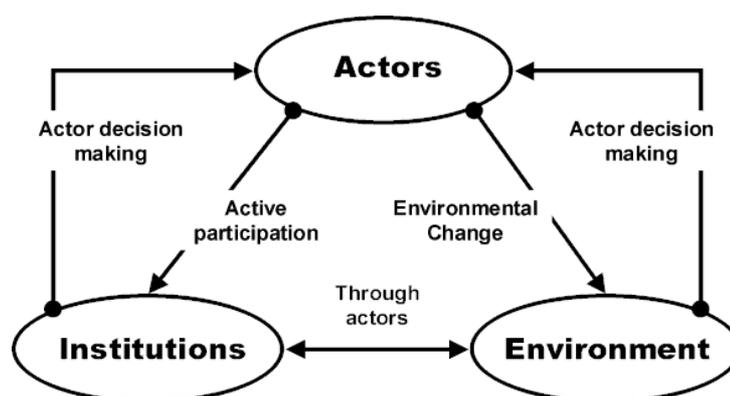


Figura 8. Modelo conceitual para o LUC³¹ envolvendo atores, instituições e meio ambiente (MANSON, 2000). Manson considera que as alterações ambientais ocorrem devido à ação de atores e instituições, os quais, por sua vez, exercem influência uns sobre os outros.

O ADSS - *Agent-based Dynamic Spatial Simulation* (MANSON, 2000; SOEPBOER, 2001) busca simular os processos de uso do solo e alteração da cobertura vegetal de uma região em função de três macroelementos desse sistema: atores, instituições e meio ambiente (Figura 8). Esse trabalho vem influenciando os rumos de MBA no espaço por integrar um segundo paradigma de simulação ao modelo: autômato celular (Figura 9). Ao considerar a possibilidade de ter um sistema híbrido, Manson consegue empregar o paradigma que melhor representa o fenômeno simulado. Por essa razão, os processos ambientais são representados por autômatos celulares, enquanto os sociais e institucionais, por agentes.

Manson (2000b) aplica o ADSS para estudo do uso do solo e alteração da cobertura vegetal para a península de Yucatán, México. Ligtenberg, Bregt e Lammeren (2001) desenvolveram um modelo para o planejamento de uso do solo com o envolvimento

³¹ LUC – Land Use/Cover Change.

de diferentes atores para Nijmegen, Holanda. A exemplo de Manson, estes autores combinam MBA com autômato celular (Figura 10).

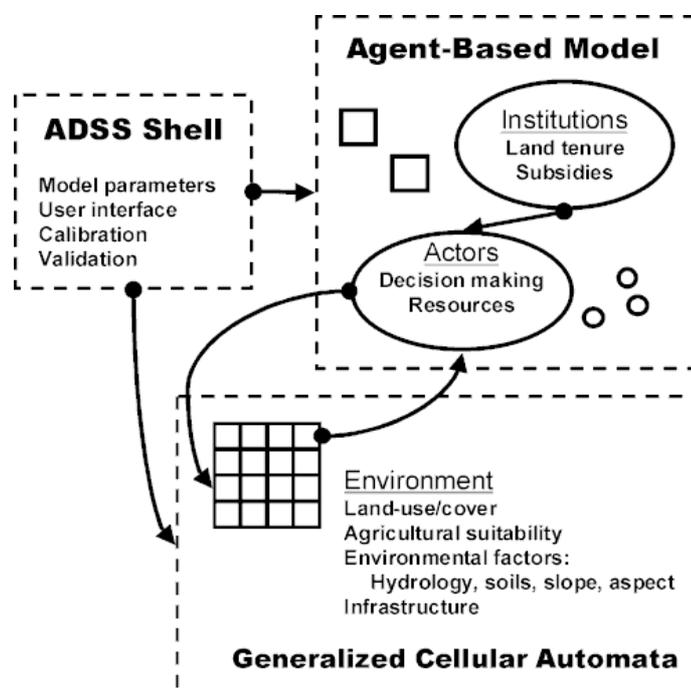


Figura 9. Agent-based Dynamic Spatial Simulation – ADSS proposto por Manson (2000). Este modelo considera a integração de Modelos Baseados em Agentes com Autômato Celular para simular a relação entre alterações ambientais em face da ação de instituições e atores.

O emprego de MBA em sistemas dinâmicos considerando sua representação espacial encontra estudos na área de planejamento de utilização de recursos naturais. Gimblett, anteriormente citado como o pesquisador de maior destaque nessa área, recentemente publicou, juntamente com outros autores, o RBSIM 2 (ITAMI *et al.*, 2000). Nesse sistema, as preferências recreacionais de visitantes de parques naturais são codificadas, de modo a possibilitar à administração do parque a exploração das conseqüências de qualquer alteração, tanto na paisagem, quanto no acesso às atrações. Desse modo, os administradores podem identificar pontos superfreqüentados, falhas no sistema viário do parque e conflitos de interesses entre usuários, informação considerada crucial para a manutenção e a melhora da qualidade natural do parque, bem como de operação.

Ainda nessa linha associada ao gerenciamento de recursos, Bousquet *et al.* (2001) propõem o emprego de MBA no gerenciamento da caça ao pato-azul, em Camarões.

A idéia básica é a mesma do RBSIM 2: avaliar o comportamento humano, no caso dos caçadores, diante da disponibilidade do recurso. A seleção de áreas de proteção ou o aumento do número de aves que podem ser abatidas, por exemplo, são medidas que podem ser guiadas pelos resultados do modelo.

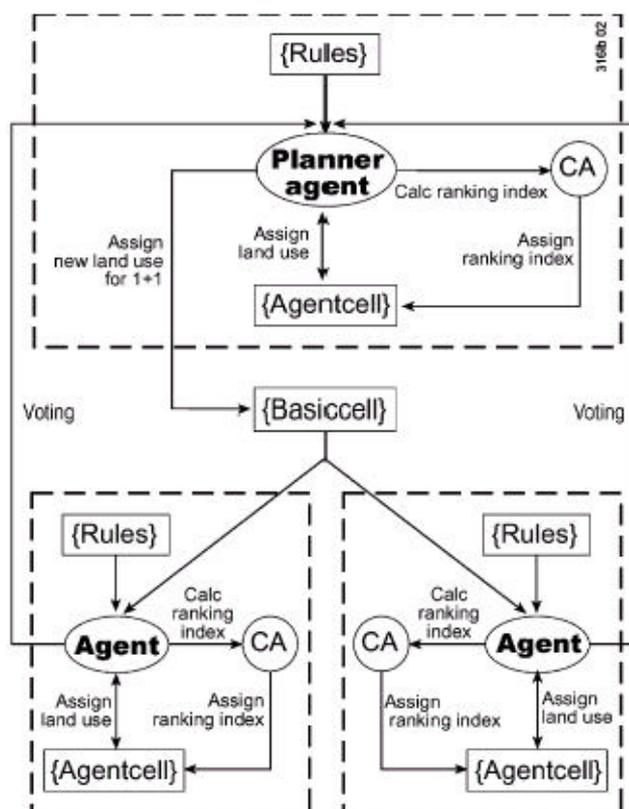


Figura 10. O modelo proposto por Ligtenberg, Bregt e Lammeren (2001) possui o mesmo enfoque dado por Manson, unindo Modelos Baseados em Agentes com Autômato Celular. O enfoque, porém, é dado ao planejamento e às suas consequências sobre os atores.

2.3 LÓGICA DIFUSA

Este item busca familiarizar o leitor aos conceitos da Lógica Difusa relevantes à condução deste trabalho. Ele não visa apresentar uma revisão bibliográfica, mas sim contribuir, em termos didáticos, para a melhor compreensão do assunto em pauta. O leitor é convidado a se aprofundar no assunto, caso seja de seu interesse.

2.3.1 Introdução

No início dos anos 1960, Zadeh teceu o seguinte comentário reconhecendo a inaptidão da matemática clássica para lidar com sistemas complexos e, por consequência, com a incerteza a eles associada (ZADEH, 1965; KLIR; YUAN, 1995):

Existem alguns que sentem que esta lacuna reflete o caráter fundamentalmente inadequado da matemática convencional – a matemática de pontos, funções, conjuntos, medidas de probabilidade, etc., precisamente definidos – para lidar com a análise de sistemas biológicos; e que, para lidar eficientemente com tais sistemas, os quais geralmente são de ordens de magnitude mais complexa do que os sistemas feitos pelo homem, nós necessitamos de um tipo de matemática radicalmente diferente, a matemática de quantidades difusas ou nebulosas, as quais não são descritas em termos de distribuições probabilísticas.

Apesar de sua grande contribuição nas áreas em que medições podem ser realizadas com precisão, como a engenharia, a “matemática convencional” apresenta-se falha quando essa condição não é satisfeita. Para Zadeh, existia uma grande lacuna entre os modelos matemáticos e suas representações empíricas, especialmente em áreas como biologia, cognição e ciências sociais, em que o grau de subjetividade e complexidade dos sistemas geralmente não permitem tais medições precisas (KLIR; YUAN, 1995; SCHNEIDER *et al.*, 1996). Essas considerações levaram Zadeh a apresentar, em 1965, a sua teoria sobre conjuntos difusos como uma extensão da teoria convencional dos conjuntos (ZADEH, 1965).

As consequências do desenvolvimento da teoria dos conjuntos difusos não se restringiram somente à teoria geral dos conjuntos. Quase que imediatamente após o lançamento de suas bases teóricas, foi reconhecido o potencial da aplicação da teoria dos conjuntos difusos na lógica, originando a Lógica Difusa, uma lógica capaz de lidar com conjuntos difusos e raciocínio aproximado (HOOGENDOORN *et al.*, 2000). Esses dois tópicos são apresentados nos itens 2.3.2 e 2.3.3, respectivamente. Ainda em relação a seu potencial de aplicação, destacam-se os Sistemas Difusos (controle e sistemas especialistas) apresentados no item 2.3.4, de especial importância para o modelo proposto, e a teoria da possibilidade e tomada de decisão, não contemplados neste estudo.

2.3.2 Conjuntos Difusos

Antes de se definir o que é Lógica Difusa, é preciso entender de que modo a aplicação da teoria clássica dos conjuntos é falha em estudos de sistemas complexos. Para Zadeh, a interpretação bivalente atribuída à pertinência de um elemento a um conjunto convencional agrega mais incerteza³² ao objeto em estudo. A abrupta transição entre os seus conjuntos, onde elementos podem apenas ser classificados como pertencentes ou não-pertencentes a um determinado conjunto, causa uma interface de incerteza nos valores próximos à transição entre dois conjuntos (ZADEH, 1965; KLIR; YUAN, 1995; KLIR; CLAIR; YUAN, 1997). Para reduzir esse problema, Zadeh (1999) propôs a utilização de *graus de pertinência*, representando uma transição gradual entre os valores próximos à interface dos conjuntos. Ou seja, um elemento passou a ter a possibilidade de pertencer a um conjunto, de não-pertencer a ele, ou pertencer a ele até um certo grau (HAVINGA *et al.*, 1999; CAMPOS; HILL, 2000). Além de possibilitar a consideração da imprecisão relacionada à percepção do raciocínio humano, essa propriedade permite que um elemento faça parte de mais de dois conjuntos simultaneamente, com diferentes graus de pertinência.

A teoria dos conjuntos difusos pode ser mais bem compreendida com o exemplo da Figura 11, onde em (a) a densidade populacional é representada por três conjuntos clássicos, sejam eles esparsamente povoados, mediamente povoados e altamente povoados, definidos pelas seguintes expressões matemáticas:

$$Ep = \{x \mid 0 \leq x \leq 2\},$$

$$Mp = \{x \mid 2 < x \leq 50\},$$

$$Ap = \{x \mid 50 < x \leq 150\},$$

³² Outros tipos de incerteza podem ocorrer, derivados de fontes de erro, como amostragem, processamento e interpretação de dados.

onde:

E_p = Esparsamente Povoado

M_p = Mediamente Povoado

A_p = Altamente Povoado

x = elemento do conjunto

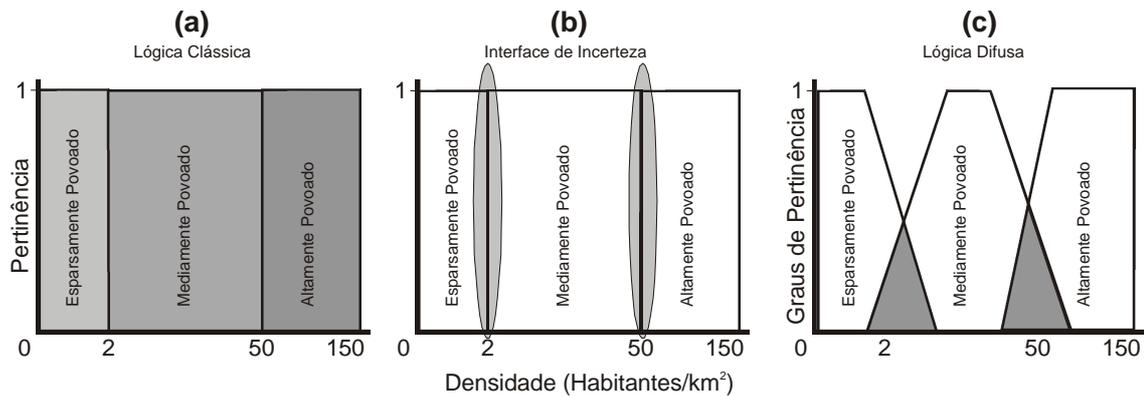


Figura 11. Representação da densidade populacional através da (a) lógica clássica, suas (b) interfaces de incerteza e (c) Lógica Difusa.

Os intervalos desses conjuntos apresentam limites bivalentes (ou binários), sendo 1 atribuído aos elementos que pertencem ao conjunto, e 0 àqueles que não pertencem. Em (b) encontra-se marcada a interface de incerteza, a qual é gerada por questões do tipo: por que o valor 1,99 de densidade populacional é classificado como esparsamente povoado, enquanto 2,01 é classificado como mediamente povoado? A classificação segundo de limites rígidos é responsável, em parte, pela incerteza associada à própria classificação, e ao contexto lingüístico³³ ao qual ela se refere.

Para o exemplo apresentado, a percepção humana indica que 1,99 e 2,01 são valores bastante próximos para pertencerem a conjuntos distintos. Considerando que o ser humano possui intuitivamente a percepção de transição gradual entre conjuntos, torna-se fácil compreender e aplicá-los em situações reais. Na teoria dos conjuntos difusos brevemente descrita, esses valores têm diferentes graus de

³³ No item 2.3.3 é apresentada a relação entre lógica difusa e variáveis lingüísticas.

pertinência (m) em relação aos dois conjuntos que possuem interface entre si (c) e que podem ser representados pelas das seguintes funções de pertinência:

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{m}: X \rightarrow [0,1] \\
 \mathbf{m}_{Ep} &= \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ para } x \leq 1 \\ (15 - x) / 14 \text{ para } 1 < x \leq 15 \\ 0 \text{ para } x > 15 \end{array} \right\} \\
 \mathbf{m}_{Mp} &= \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ para } 20 \leq x \leq 40 \\ (x - 1) / 19 \text{ para } 1 < x < 20 \\ (68 - x) / 19 \text{ para } 40 < x \leq 69 \\ 0 \text{ para } x > 69 \end{array} \right\} \\
 \mathbf{m}_{Ap} &= \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ para } x \geq 69 \\ (x - 40) / 29 \text{ para } 40 < x \leq 69 \\ 0 \text{ para } x < 40 \end{array} \right\}
 \end{aligned}$$

Onde:

\mathbf{m} = Grau de pertinência para conjunto X

\mathbf{m}_{Ep} = Grau de pertinência para Ep

\mathbf{m}_{Mp} = Grau de pertinência para Mp

\mathbf{m}_{Ap} = Grau de pertinência para Ap

A partir dessas funções, é possível determinar o grau de pertinência atribuído para os dois valores anteriormente citados.

1) Cálculo do grau de pertinência da densidade populacional 2,01 para o conjunto esparsamente povoado (a) e mediantemente povoado (b):

$$\begin{aligned}
 \text{a) } \mathbf{m}_{Ep} &= (15 - x) / 14 \longrightarrow \mathbf{m}_{Ep} = 15 - 2,01 / 14 \\
 & \mathbf{m}_{Ep} = 0,927
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{b) } \mathbf{m}_{Mp} &= (x - 1) / 19 \longrightarrow \mathbf{m}_{Mp} = 2,01 - 1 / 19 \\
 & \mathbf{m}_{Mp} = 0,053
 \end{aligned}$$

2) Cálculo do grau de pertinência da densidade populacional 1,99 para o conjunto esparsamente povoado (a) e mediantemente povoado (b):

$$\begin{aligned} \text{a) } m_{Ep} &= (15 - x) / 14 \longrightarrow m_{Ep} = 15 - 1,99 / 14 \\ m_{Ep} &= 0,929 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) } m_{Mp} &= (x - 1) / 19 \longrightarrow m_{Mp} = 1,99 - 1 / 19 \\ m_{Mp} &= 0,052 \end{aligned}$$

Como resultado da aplicação da teoria dos conjuntos difusos à definição de densidade populacional do exemplo, o primeiro valor (2,01), que no conjunto convencional não pertence ao conjunto Ep , passa a pertencer com $m_{Ep} = 0,927$; ou seja, um valor bastante próximo da pertinência máxima, que é 1. Retornando ao conjunto convencional, o valor 2,01 pertence ao conjunto Mp . Porém, se aplicado ao conjunto difuso, ele passa a ter $m_{Mp} = 0,053$, sendo sua pertinência quase nula, mas ainda assim pertence ao conjunto mediamente povoado.

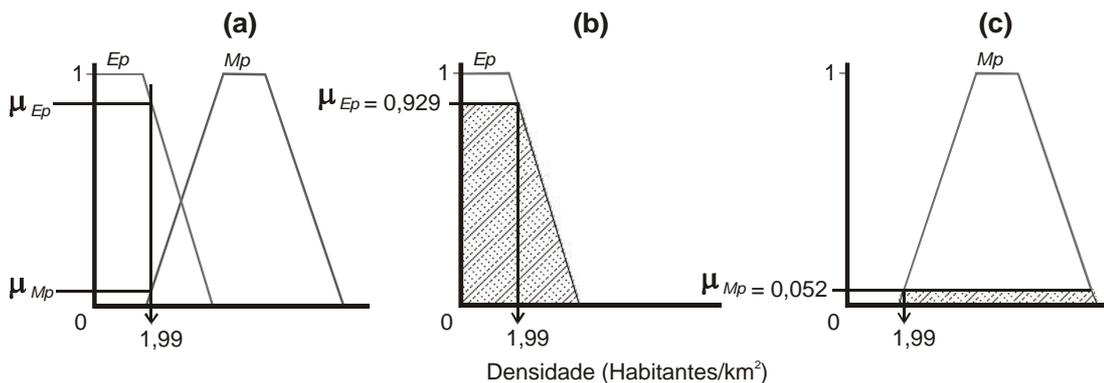


Figura 12. Exemplo do funcionamento dos graus de pertinência. Em (a) encontra-se indicado o valor que se busca verificar a pertinência, que é 1,99. Em (b) e (c) os conjuntos Ep e Mp são apresentados separadamente para efeito de melhor visualização, sendo a pertinência representada por m e pela área hachurada do respectivo triângulo.

Essa transição pode ser mais bem observada graficamente. A Figura 12 apresenta a interpretação gráfica para o segundo valor de densidade populacional discutido (1,99). No gráfico, em (a) encontram-se representados os conjuntos Ep e Mp e os respectivos graus de pertinência referentes ao valor de densidade populacional. Em (b) e (c) os dois conjuntos estão representados separadamente, para melhor visualização. É importante observar que m pode ser associado à área do conjunto (hachura), a qual é usada em operações de álgebra difusa.

2.3.3 Raciocínio Aproximado e Variáveis Lingüísticas

A maior motivação para o emprego de conjuntos difusos em estudos sobre sistemas complexos está em sua capacidade de possibilitar o manuseio da incerteza e probabilidade. Tradicionalmente, a incerteza tem sido considerada indesejável, devendo ser evitada em qualquer estudo, sob pena de gerar conclusões imprecisas ou falsas. Porém, o mundo real está repleto de imprecisões e incertezas, características que o tornam complexo. A própria percepção humana, de um modo geral, é ambígua. À medida que a complexidade dos sistemas aumenta, a habilidade humana em tecer comentários ao mesmo tempo precisos e significativos (relevantes) sobre seu comportamento diminui, até o ponto em que ambos se tornam mutuamente exclusivos (WANG, 2000; KLIR; YUAN, 1995). Nesse sentido, uma análise precisa do comportamento de sistemas humanos não apresenta relevância para estudos de natureza social, política e econômica que envolvam indivíduos ou grupos.

Apesar da ambigüidade, o raciocínio humano e a transmissão de conhecimento são eficientemente conduzidos com a linguagem natural. Ela possui a característica de flexibilidade de representação quando comparada a fórmulas matemáticas. Por exemplo, é mais fácil explicar a uma pessoa como estacionar um carro do que tentar fazê-lo através de equações diferenciais (SCHNEIDER *et al.*, 1996). Esse fenômeno é explicado pelo fato de que elementos-chave do raciocínio humano não são números, mas sim variáveis lingüísticas³⁴. Por conseqüência, o raciocínio humano está habilitado a simplificar a realidade de acordo com suas necessidades e contexto, num processo denominado raciocínio aproximado.

O raciocínio aproximado foi descrito por Zadeh como o tipo de raciocínio que não é exato, nem inexato (LAUGHLIN, 2000). Essa descrição pode ser facilmente aplicada aos graus de pertinência dos conjuntos difusos anteriormente apresentados. Se esses conjuntos representarem termos lingüísticos, pode-se, então, transferir a

³⁴ Segundo Zadeh (1999), uma variável lingüística possui valores associados a palavras ou sentenças numa linguagem natural ou artificial. O autor cita o seguinte exemplo: *idade* é uma variável lingüística quando associada não a números (20 anos, 34 anos), mas a termos como jovem, muito jovem, velho, etc.

noção de graus de pertinência para graus de verdade em relação ao significado do termo. Ou seja, uma variável como altura pode apresentar diferentes graus de verdade para diferentes indivíduos. Ainda sim, o termo “alto”, por exemplo, representa um valor aceito por todos.

Essa propriedade pode ser observada no exemplo do item 2.3.2, em que valores brutos de densidade populacional encontram-se associados aos conjuntos *esparsamente*, *mediamente* e *altamente* povoados. É importante notar que o termo lingüístico apresentado no exemplo, “povoado”, é acompanhado de expressões modificadoras³⁵ de seu sentido. *Esparsamente*, *mediamente* e *altamente* são expressões que facilitam a compreensão lingüística do termo “povoado”. Blásquez e Gómez-Skarmeta (2000) corretamente argumentam que a definição de modificadores tem mais a ver com heurística e senso comum do que com teoria matemática. Desse modo, a forma atribuída a um conjunto difuso (Figura 13) depende do contexto em que este é usado e da interpretação dada por cada indivíduo. Isso significa dizer que cada um tem a sua percepção ou expectativa em relação ao termo lingüístico, interpretando-o à sua própria maneira. Por exemplo, para um indivíduo, “esparsamente povoado” pode significar dois habitantes/km², enquanto, para outro, seis habitantes/km². Apesar dessa diferença, esses termos variam dentro de certos limites, que podem ser identificados e acomodados num único conjunto. Essa acomodação se apresenta, em parte, como um dos mecanismos de aproximação (ou generalização) do raciocínio humano.

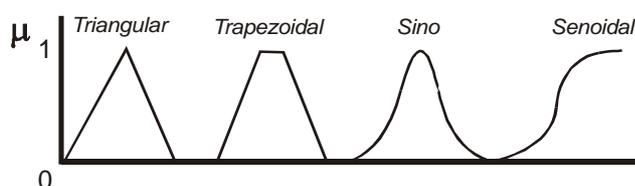


Figura 13. Formatos mais comuns para a representação de conjuntos difusos.

Como consequência dessa capacidade de acomodar termos lingüísticos em conjuntos passíveis de operação matemática, a teoria dos conjuntos difusos oferece condições para estudos em áreas tradicionalmente envolvidas com o

³⁵ Termo originado do inglês, *modifiers* ou *hedgets*.

comportamento humano. Contudo, ela deve ser vista com cuidado em relação ao contexto em que é utilizada. Os limites (forma) dos conjuntos podem variar não apenas de indivíduo para indivíduo, mas de cultura para cultura. Tome-se o exemplo fictício da variável lingüística “estatura”, composta pelos seguintes valores: alta (Ae), média (Me) e baixa (Be), conforme representado na Figura 14. Essas variáveis encontram diferentes percepções entre pigmeus africanos (a) e holandeses (b). As diferentes percepções da variável lingüística “estatura”, em diferentes contextos raciais, geram expectativas distintas para com o valor da estatura, o que reflete nas diferentes representações dos conjuntos difusos. No exemplo, o valor 1,60 metro significa alta estatura para pigmeus, enquanto, para holandeses, esse valor está associado à baixa e à média estaturas.

O potencial da aplicação de conjuntos difusos para a representação matemática de variáveis lingüísticas consiste numa das propriedades mais importantes da teoria dos conjuntos difusos, possibilitando o desenvolvimento de modelos humanamente compreensíveis, aspecto relevante para o modelo proposto neste trabalho.

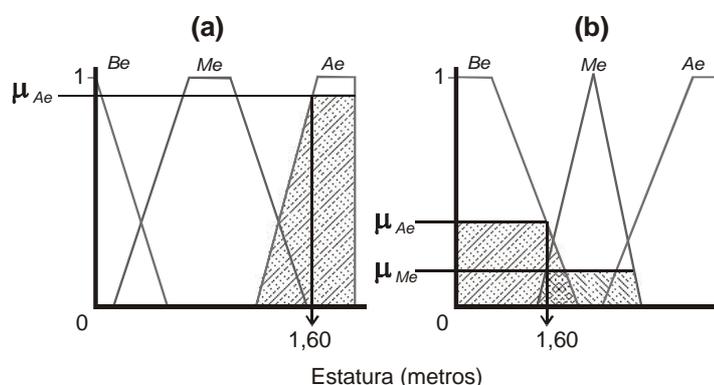


Figura 14. Variação cultural do valor de variáveis lingüísticas. Em (a) a representação do conjunto estatura para pigmeus, onde o valor 1,6 corresponde à estatura alta (Ae); e (b) para holandeses, o mesmo valor de estatura encontra-se associado aos conjuntos baixa e média estatura.

2.3.4 Controle Difuso

Um sistema de controle (Figura 15), em termos genéricos, consiste em um mecanismo de percepção do estado de um objeto qualquer sob controle, seguido do

processamento dessa informação segundo regras previamente estabelecidas³⁶, e envio de comandos que irão ou não alterar o estado deste objeto³⁷ (TURCHIN *et al.*, 2001). Um controle difuso, por sua vez, nada mais é do que um sistema de controle cujas regras estão representadas através de Lógica Difusa. Essa característica possibilita que o raciocínio aproximado, anteriormente descrito, seja incorporado em sistemas de controle. Como consequência, termos lingüísticos podem ser utilizados na representação das regras de controle (KOLODZIEJ; PRIEMER, 1999; CAMPELLO; AMARAL, 2001). Além disso, uma importante diferença merece destaque. O processo de inferência de um sistema de controle difuso (SCD) é composto de várias regras processadas paralelamente, porém uma única resposta lógica resulta da soma das conclusões de cada regra. Essa característica permite a utilização de regras simples que, combinadas, representam um padrão complexo de controle (AIMAX, 2001).

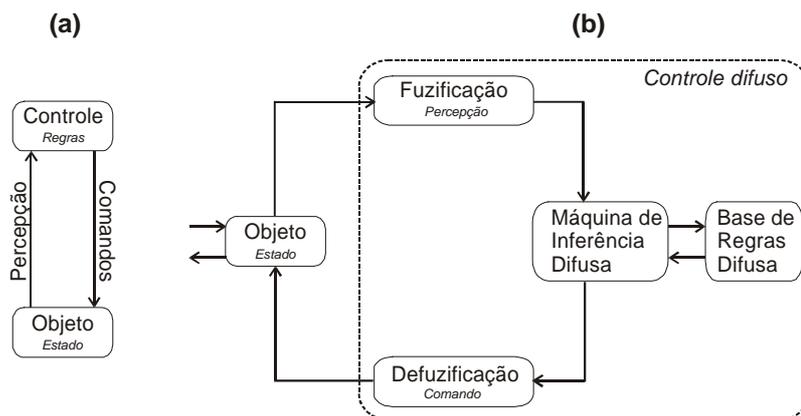


Figura 15. Representação esquemática de um sistema de controle (a) tradicional e (b) difuso.

A seguir, é apresentada a descrição/demonstração do funcionamento de um SCD, com o método de inferência por interpolação (AIMAX, 2001; SCHNEIDER *et al.*, 1996; KLIR; YUAN, 1995) adotado neste trabalho.

³⁶ Os sistemas de controle convencionais geralmente utilizam equações ou expressões lógicas de inferência, como regras do tipo se/então – conhecidas como regras de produção.

³⁷ Essa noção de controle é suficiente para o que se busca desenvolver neste trabalho.

a) Base de Regras

A base de regras expressa o conhecimento de operação do controle por meio de regras. Esse conhecimento pode ser obtido de diferentes maneiras, sendo comum a sua extração a partir de entrevistas com especialistas na área. A partir desse conhecimento, são construídas regras com premissas associadas a variáveis de estado – entrada –, e com conclusões referentes ao comando – saída desejada. Para o exemplo da Figura 16, são utilizadas as regras a seguir:

Regra 1: **se A, então X.**

Regra 2: **se B, então Y.**

Regra 3: **se C e D, então Z.**

Os valores A, B, C e D nessas regras correspondem aos conjuntos difusos de entrada e constituem a premissa das regras. A forma de cada conjunto representa a variável lingüística de acordo com a percepção do especialista de quem o conhecimento foi extraído. Desse modo, o conjunto “A” poderia estar associado, por exemplo, ao termo “temperatura alta”, ou a “pouca distância”. O mesmo tipo de significado lingüístico pode ser atribuído aos conjuntos difusos de saída X, Y e Z (conclusão), como, por exemplo, “bom”, “razoável” e “ruim”. Desse modo, a Regra 1 poderia ser algo como: se a temperatura da água está alta, então o chimarrão é ruim.

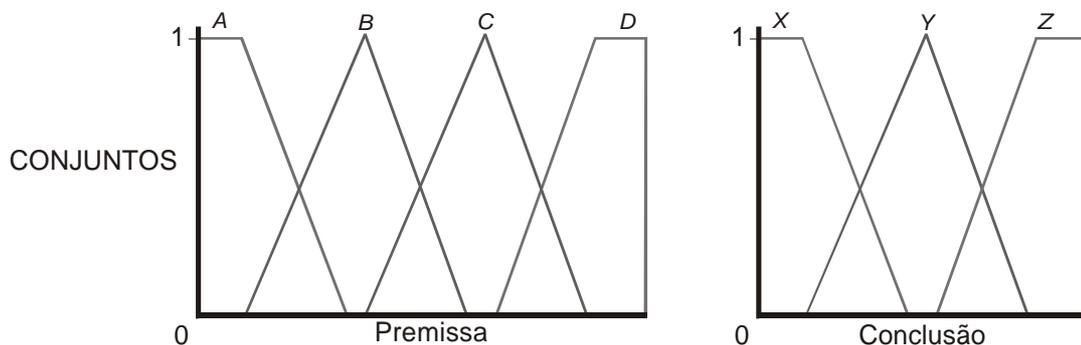


Figura 16. Exemplo de base de regras difusa.

b) Fuzificação/Máquina de Inferência

O módulo de fuzificação realiza a transformação de um valor de entrada não difuso para um valor difuso. Este valor possui um determinado grau de pertinência para um ou mais conjuntos difusos (conforme apresentado no item 2.3.2). No exemplo da Figura 17, o valor de entrada q intersecta os conjuntos A e B , gerando diferentes graus de pertinência para esses conjuntos. Essa pertinência é expressa pela área hachurada em cada conjunto de entrada, sendo aqui denominada de valor difuso de entrada.

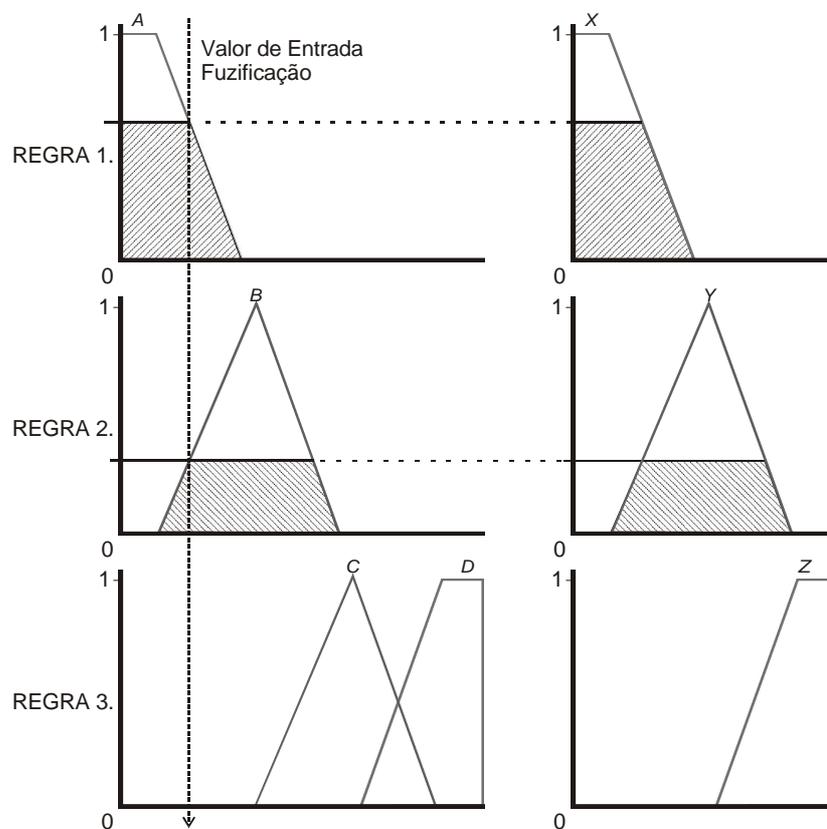


Figura 17. Exemplo de fuzificação e inferência difusa.

A escolha entre os operadores “e” e “ou” influencia o valor a ser transferido para o conjunto de saída. Para o primeiro operador, transfere-se o valor mínimo, enquanto, para o segundo, o máximo (Figura 18). A combinação destes operadores é conhecida como maxmin.

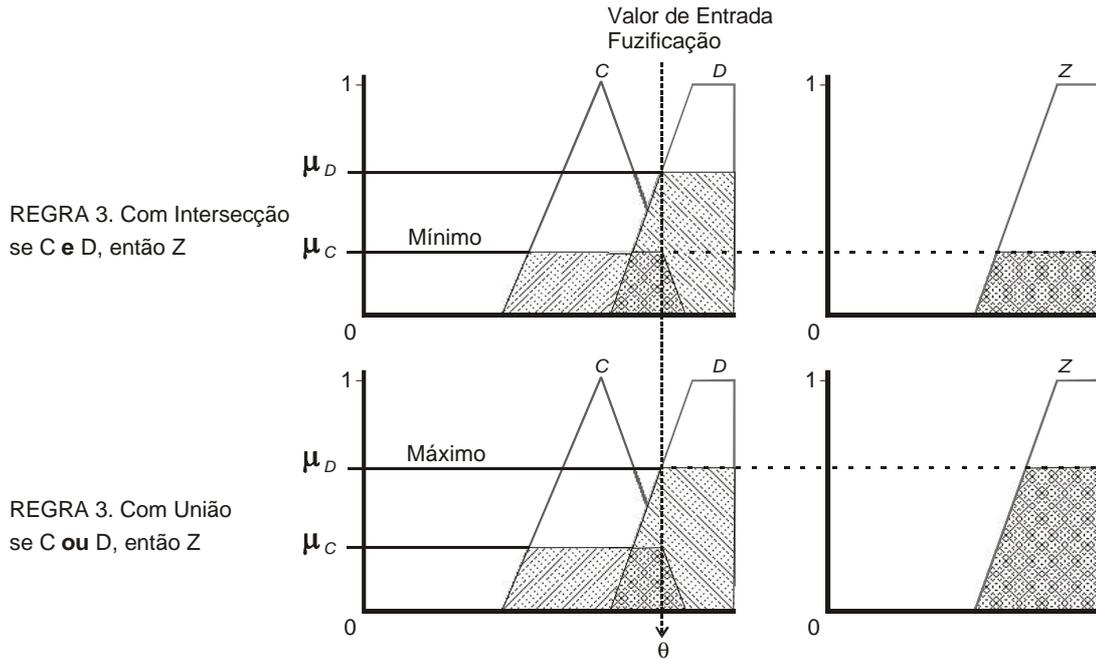


Figura 18. Exemplo de operação de intersecção e união em conjuntos difusos.

c) Defuzificação

Existem diversos métodos para transformar o conjunto difuso de saída em um valor não difuso. O mais comum é o do centróide, que consiste em determinar o centro de massa do conjunto difuso de saída, obtendo-se o valor não difuso de saída a partir da projeção desse ponto sobre o eixo suporte. No exemplo da Figura 19, esse valor é representado por ϕ .

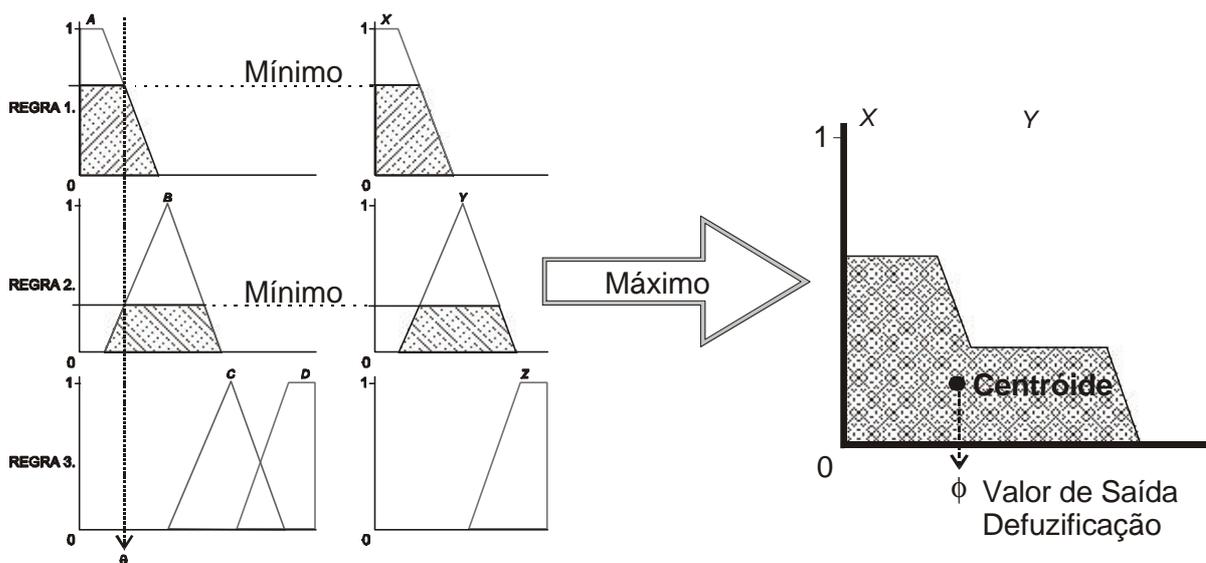


Figura 19. Exemplo de operação maxmin e defuzificação.

2.4 APLICAÇÃO DA LÓGICA DIFUSA EM MODELOS BASEADOS EM AGENTES

O emprego da Lógica Difusa em agentes é bastante insignificante ante o volume de trabalhos em outras áreas de pesquisa. Entre os artigos que visam tratar desse sistema híbrido, a maioria reflete pesquisas na área de mecanismos de controle de navegação e percepção do espaço em robótica.

Na área de modelos e simulações baseados em agentes, segundo o enfoque dado por este trabalho, foi possível a identificação, até o momento, de apenas dois trabalhos. O primeiro pertence a Gimblett (2000). Neste trabalho, o autor e seu grupo de colaboradores propõem o emprego de um modelo baseado em agentes para simular e avaliar cenários de excursões em balsas, para o Rio Colorado, no *Grand Canyon National Park*. No modelo, um mecanismo de inferência difusa é empregado como parte do processo de decisão dos agentes, diante da possibilidade ou não de o usuário do parque fazer o passeio. Esse processo, no entanto, ocorre apenas em um dos ramos da árvore de decisão e não apresenta nenhuma relação com o componente espacial da simulação.

No segundo, Campos e Hill (2000) apresentam uma simulação de predador e presa, na qual as percepções de distância e as regras de captura e fuga encontram-se codificadas em conjuntos difusos (Figura 20). Resistência, velocidade, direção e energia constituem atributos de cada agente, sendo determinantes em seu sucesso de fugir ou capturar.



Figura 20. Modelo esquemático baseado na relação predador/presa (CAMPOS; HILL, 2000). Nesta aplicação o predador avalia, por meio de um sistema difuso, a distância e a oportunidade de capturar a presa. Por sua vez, a presa faz uso do mesmo mecanismo para fugir do predador.

CAPÍTULO

3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

“The scientific method is the process by which scientists, collectively and over time, endeavor to construct an accurate (that is, reliable, consistent and non-arbitrary) representation of the world.”

Frank Wolfs, 2000

3.1 A BUSCA DO CONHECIMENTO

A idéia de expansão do conhecimento humano está intimamente ligada à ciência e, por extensão, ao termo “metodologia científica”. A ciência encontra-se orientada ao desenvolvimento de leis e teorias que expliquem, predigam, compreendam e controlem um fenômeno qualquer (SANTOS, 2000). Já a metodologia científica estabelece, em linhas gerais, critérios e procedimentos para o desenvolvimento de pesquisas, para garantir a consistência e reprodutibilidade dos experimentos, e o mínimo de viés por parte da interpretação dos resultados pelo pesquisador (MARCONI; LAKATOS, 2001; MALHOTRA, 2000).

Apesar do rigor associado ao método científico, sua linha de raciocínio é bastante simples e pode ser representada por cinco etapas básicas (WIKIPEDIA, 2002):

- **observação do fenômeno:** coleta de medidas e evidências relacionadas ao fenômeno que se busca estudar;
- **formulação de hipóteses:** geração de hipóteses que expliquem o fenômeno;
- **previsão do fenômeno:** emprego da hipótese para prever os resultados de novas observações ou medições;
- **experimentação:** desenvolvimento de experimentos para testar as previsões postuladas;
- **avaliação:** validação das hipóteses através da verificação dos resultados obtidos.

Cada uma dessas linhas representa por si só um universo a ser aprofundado. Contudo, não cabe ao escopo deste trabalho qualquer discussão sobre o assunto. Faz-se necessária, sim, a classificação da tese diante de sua natureza, tipo de abordagem, objetivos e procedimentos técnicos (SILVA; MENEZES, 2001), de modo a esclarecer o tipo de construção de conhecimento adotado ao longo do trabalho.

Por se tratar de uma pesquisa que visa ao desenvolvimento de uma ferramenta de apoio ao estudo da percepção e comportamento espacial, este trabalho é de natureza aplicada. Quanto à abordagem, ele consiste em uma mistura entre aproximação qualitativa e quantitativa; qualitativa por tratar dos aspectos associados à percepção e ao comportamento, os quais apresentam características subjetivas, difíceis de ser quantificadas. Por outro lado, tanto o emprego da Lógica Difusa para modelar variáveis lingüísticas e comportamentos quanto a avaliação dos resultados operam na linha da pesquisa quantitativa.

O desenvolvimento de uma ferramenta híbrida caracteriza incursões de caráter exploratório em diversas disciplinas, visando à busca de soluções potenciais e novos enfoques ao desenvolvimento da pesquisa. Esses novos enfoques são potencializado neste trabalho pelo emprego de diversas técnicas de pesquisa, como a pesquisa bibliográfica, a pesquisa experimental e o estudo de caso.

Fases do Ciclo de Construção do Conhecimento	Etapas Gerais da Metodologia Científica
Investigação	Observação
Intervenção	Formulação de Hipóteses Previsão de Fenômenos Experimentação
Avaliação	Avaliação

Figura 21. Fases do ciclo de geração do conhecimento.

Silva (2001) considera que a construção do conhecimento científico ocorre em um ciclo com três fases distintas: investigação, intervenção e avaliação. Em realidade, essas três fases apenas acomodam, de modo mais lógico, as cinco etapas apresentadas anteriormente, conforme apresentado no Figura 21.

3.2 ESTRUTURA GERAL DA PESQUISA

Conforme apresentado no item 1.4, o objetivo geral desta tese consiste no desenvolvimento de um modelo de simulação baseado em Agentes Inteligentes e Lógica Difusa, orientado ao estudo do comportamento de usuários em zonas costeiras, de modo a avaliar suas percepções espaciais e a distribuição no meio ambiente.

Para garantir o alcance desse objetivo com consistência e qualidade, este trabalho de pesquisa foi organizado segundo o ciclo de construção do conhecimento proposto por Silva (2001).

3.2.1 Investigação

A investigação associada ao tema de pesquisa proposto deve ser dividida em duas linhas de ação. A primeira é relacionada à verificação do estado de arte em Modelos Baseados em Agentes e à potencial aplicação de lógica e Sistemas Difusos nesses modelos. Essa verificação foi conduzida por meio de levantamento bibliográfico e faz parte da fundamentação teórica apresentada no capítulo 2.

A segunda linha foi orientada para a produção de dados para a construção do estudo de caso. A investigação, nesse caso, visou à geração dos subsídios necessários ao teste do modelo a ser proposto, vindo a constituir parte do capítulo sobre o estudo de caso.

3.2.2 Intervenção

a) Formulação de hipóteses

Esta tese parte da hipótese geral de que é viável considerar a combinação de Modelos Baseados em Agentes e Lógica Difusa para estudos de percepção e comportamento espacial dinâmico de grupos de usuários. Por consequência, três questões básicas foram formuladas (item 1.2) e representadas a seguir, para balizar o desenvolvimento dos trabalhos.

- É viável desenvolver modelos de simulação dinâmica espacial para a região costeira com base em Agentes Inteligentes e em Lógica Difusa?
- Padrões de comportamento de usuários extraídos e/ou abstraídos de análises espaciais podem servir de subsídio à construção desses modelos?
- Os resultados das simulações guardam correspondência com o comportamento real dos usuários de zonas costeiras?

b) Previsão de Fenômenos

Neste item encontra-se ancorada a primeira etapa da experimentação, posto que um protótipo inicial em MATLAB® foi desenvolvido para testes genéricos. A idéia da viabilidade do emprego de Lógica e Sistemas Difusos para a construção de agentes é testada mediante o estudo de comportamentos considerados elementares, como atração e repulsão.

c) Experimentação

Dois protótipos de sistema de simulação compõem a fase de experimentação. O primeiro, desenvolvido no MATLAB, teve por objetivo verificar a viabilidade do emprego de Lógica Difusa para modelagem de percepção e comportamento espacial. O segundo protótipo, desenvolvido em C++, fornece as ferramentas para a aplicação do estudo de caso e teste da hipótese.

3.2.3 Avaliação

A avaliação consiste na validação do modelo proposto diante das três questões anteriormente postas. Esse procedimento valida a hipótese, concluindo os esforços da pesquisa.

3.3 DOCUMENTAÇÃO

Os procedimentos metodológicos devem ser materializados na documentação da pesquisa. A teoria e os procedimentos experimentais, juntamente com referências bibliográficas e anexos, constituem o documento final do trabalho, ou seja, a própria tese.

CAPÍTULO

4 MODELO PROPOSTO

“Whatever occurs, occurs in space and time. Therefore our perception of the world is inherently spatial and temporal: objects have a location, and events are embedded in a stream of time. We speak of models when we phrase our perceptions in a way that they can be communicated to others. We use models for communication but also for understanding the world ourselves, and by playing around with the models we discover how they work and how the world they represent may evolve in the future. We may then systematically experiment with the models to find out ways to avoid undesirable and achieve desirable futures.”

Fotheringham e Wegener, 2000

4.1 GERENCIAMENTO COSTEIRO INTEGRADO

4.1.1 Definição

Cincin-Sain e Knecht (1998) definem Gerenciamento Costeiro Integrado (GCI) como um processo contínuo e dinâmico por meio do qual decisões são tomadas visando ao uso sustentável e ao desenvolvimento e à proteção das áreas e recursos costeiros e marinhos. Os autores complementam a definição indicando a necessidade de integração entre os diferentes setores³⁸ e instituições que atuam sobre a zona costeira.

A idéia de integração reflete o princípio defendido por Ferrand (1996), apresentado no item 2.2.3, subitem “b”, ou seja, para que decisões de planejamento e medidas de gerenciamento se traduzam em ações práticas e legítimas, é de crucial importância a integração entre os diversos setores existentes na região costeira, quaisquer que sejam eles. O reconhecimento da necessidade de integração é ponto

³⁸ Como setores se entende qualquer tipo de atividade desenvolvida na zona costeira (e.g., setor público, pesca, turismo, indústria, etc.).

comum nas publicações mais tradicionais da área (SORENSEN; McCREARY, 1990; PERNETTA; ELDER, 1993; CLARK, 1996; CINCIN-SAIN; KNECHT, 1998), tendo recebido considerável atenção durante as discussões realizadas durante a ECO'92 (UNCED, 1992).

4.1.2 Modelo Conceitual do Sistema Costeiro

Considerar a condução do gerenciamento costeiro segundo a definição apresentada no item 4.1.1 requer o reconhecimento dos elementos existentes no sistema costeiro e, por extensão, a identificação dos setores nele atuantes. Weide (1994) propõe um modelo geral para esse sistema (Figura 22), visando à condução das medidas de gerenciamento costeiro de forma integrada.

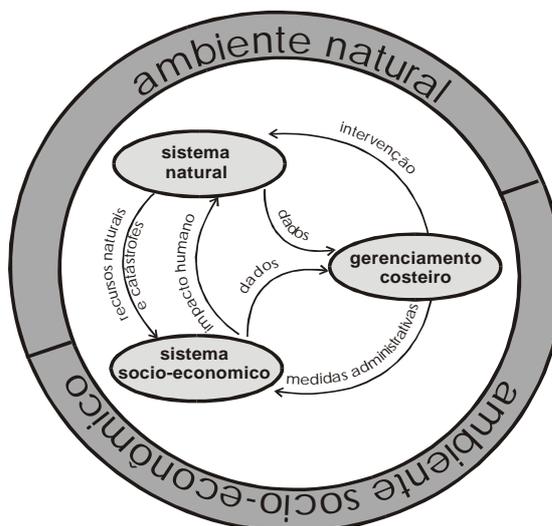


Figura 22. Modelo conceitual do sistema costeiro proposto por Weide (1994). Nele os sistemas natural e socioeconômico estão em relação dinâmica, um afetando o outro. Para Weide, a função do Gerenciamento Costeiro consiste em equilibrar essa relação por meio de medidas de gerenciamento do meio ambiente e intervenções nele.

A noção de níveis macroscópico e microscópico discutida nos itens 2.2.1 e 2.2.2, subitem “c”, encontra-se embutida neste modelo. O nível de abstração mais elevado (macro) é formado por dois subsistemas: o ambiente natural e o ambiente socioeconômico. Um segundo nível de observação, mais detalhado, permite a subdivisão desses dois subsistemas em (subsub)sistema natural, com ênfase nos recursos e serviços que o ambiente natural oferece; e (subsub)sistema

socioeconômico, orientado aos processos antrópicos. Nesse nível de abstração, é possível observar os primeiros tipos de relacionamentos e processos que ocorrem no sistema, sendo o gerenciamento costeiro encarado como um mediador/regulador destes, com o claro objetivo de desenvolver e manter a qualidade ambiental da zona costeira.

É importante, a esta altura, traçar um paralelo entre o modelo proposto por Manson (Figura 8) e o modelo de Weide para a zona costeira (Figura 22), mesmo sendo cada um deles orientado a diferentes tipos de estudo. Uma parte do modelo de Manson pode ser vista em um nível de abstração mais detalhado que o modelo de Weide. No modelo de Manson, o sistema socioeconômico encontra-se representado por atores e instituições³⁹, enquanto o sistema natural permanece representado no mesmo nível que em Weide. O modelo de Manson induz o leitor a considerar que o gerenciamento ambiental está em um nível mais alto de abstração, como se o modelo fosse desenvolvido aos olhos de quem gerencia o problema. Essa comparação ilustra um aspecto importante em relação aos modelos conceituais: a possibilidade de consideração dos elementos⁴⁰ do sistema em diferentes níveis de abstração, conforme o grau de detalhamento, e visão/necessidade que se tem para cada sistema.

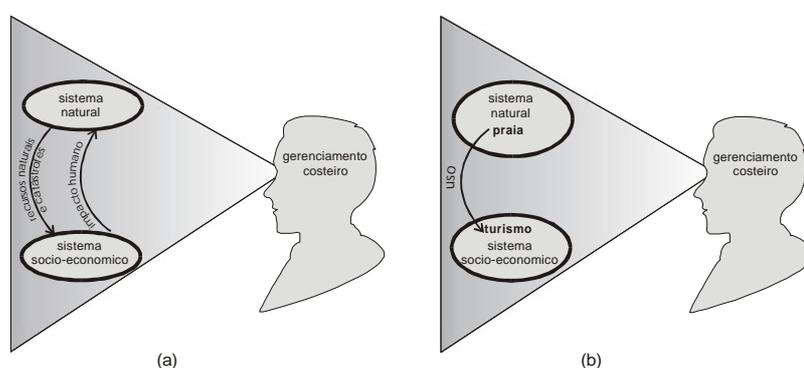


Figura 23. (a) Abstração do modelo de Weide, segundo os “olhos” de Manson; e (b) exemplo de abordagem utilitária entre praia e turismo.

³⁹ Atores e instituições podem ser encarados como desdobramentos do termo “setores”.

⁴⁰ É importante notar que o termo “elemento” na análise de sistemas é, neste trabalho, considerado sinônimo do termo “setor”, utilizado em GCI. Contudo, um recurso natural não é um setor em GCI, mas, ainda assim, é um elemento em análise de sistemas.

a) Abordagem Utilitária

Olhar o sistema costeiro com os “olhos” de Manson, ou seja, de quem gerencia (Figura 23a), permite que o enfoque seja orientado aos elementos do sistema natural e socioeconômico. Como resultado, o sistema natural pode ser visto se relacionando de maneira utilitária com o sistema socioeconômico. Traduzindo isso em termos práticos, o sistema natural oferece milhares de oportunidades ao sistema socioeconômico. Este, por sua vez, impacta positiva ou negativamente o sistema natural.

Essa abordagem utilitária insere a idéia de usos (Figura 23b) e requer um nível de observação mais detalhado para ambos os sistemas. Sob essa ótica, um recurso natural, elemento do sistema natural, está associado a um ou mais tipos de usos. Esses usos originam-se nas necessidades e oportunidades que diferentes elementos (setores) do sistema socioeconômico possuem e vislumbram.

Couper (1983)	Sorensen e McCreary (1990)	Pido e Chua (1992)	Vallenga (1992)	Hawaii ORM (1991)
Navegação e comunicação	Pesca	Agricultura	Desenv. portuário	Pesquisa
Recursos minerais e energia	Áreas naturais e sistemas de proteção	Pesca e aquacultura	Navegação	Recreação
Recursos biológicos	Suprimento de água	Infra-estrutura	Emissários submarinos	Desenv. portuário
Lançamento de resíduos e poluição	Recreação	Mineração	Cabos	Pesca
Estratégia e defesa	Turismo	Desenv. portuário	Transporte aéreo	Proteção dos ecossistemas marinhos
Recreação	Desenv. portuário	Desenv. industrial	Recursos biológicos	Erosão costeira
Pesquisa	Energia	Turismo	Hidrocarbonetos	Gerenciamento de resíduos
Qualidade ambiental marinha	Planejamento de derramamento de óleos e substâncias tóxicas	Desenv. urbano	Recursos metálicos	Energia
	Desenv. industrial	Florestas	Energia	Mamíferos marinhos
	Agricultura	Navegação	Defesa	
	Maricultura		Recreação	
			Desenvolvimento	
			Lançamento de resíduos	
			Pesquisa	
			Arqueologia	
			Proteção e preservação ambiental	

Figura 24. Modelos de usos para a zona costeira (CINCIN-SAIN; KNECHT, 1998).

A idéia de modelos desenvolvidos a partir dos usos da zona costeira e dos oceanos não é nova. Cincin-Sain e Knecht (1998) apresentam um quadro com exemplos de modelos de usos para a zona costeira, resumindo a visão de diversos autores ao longo do tempo (Figura 24). Considerar o sistema costeiro a partir dos usos parece facilitar a compreensão dos elementos nele presentes, qualquer que seja o nível de abstração empregado. Ao identificar um uso, automaticamente será reconhecido o recurso natural a ele associado e quem o usa. Assumindo-se que geralmente os problemas que existem na zona costeira têm origem no mal uso dos recursos, então reconhecer os elementos do sistema dessa maneira sugere ser a maneira mais apropriada para quem busca solucionar problemas. Essa é uma aproximação simples e eficiente para mapear os elementos do sistema costeiro.

4.2 MODELO BASEADO EM AGENTES E O GERENCIAMENTO COSTEIRO

A aplicação de MBA para o sistema costeiro apresentado no item 4.1 possui um potencial. Primeiro, pelo enfoque que vem sendo dado por pesquisadores para o GCI. A visão sistêmica orientada à compreensão dos processos que ocorrem na zona costeira, prática comum há mais de 10 anos nesse campo de conhecimento, disponibiliza não apenas dados e referências sobre o tema, mas também uma predisposição natural para a incorporação de modelos baseados em agentes, no rol de ferramentas utilizadas no estudo da zona costeira (SPERB; PACHECO; KHATOR, 2001).

Em segundo lugar, o GCI compartilha suas teorias com as ciências sociais, sendo esta última área testemunha de bons resultados em estudos onde o MBA foi empregado. Macy e Willer (2001) defendem o uso de MBA em estudos de natureza social, argumentando que o ser humano segue regras codificadas em forma de normas, convenções, protocolos, moral e hábitos sociais e heurísticos, os quais são passíveis de codificação para simulação. Embora essas regras sejam bastante simples, elas capturam padrões globais que podem não ser tão óbvios, sendo bastante difíceis de ser compreendidos. O Modelo Baseado em Agentes busca explorar o efeito dessas regras simples sobre o comportamento global do sistema, através das propriedades emergentes apresentadas no item 2.2.2, subitem “c”.

Terceiro, considerar o argumento de Macy e Willer (2001) exposto no parágrafo acima como verdade justifica o emprego de Lógica Difusa para codificação dessas regras em Agentes Inteligentes. Em outras palavras, o MBA pode passar a incluir regras obtidas/extraídas diretamente de qualquer pessoa, sem a necessidade de transformação dessas regras em equações matemáticas.

O quarto aspecto do potencial de aplicação de MBA no gerenciamento costeiro se relaciona à relativa escassez de estudos que associem e determinem a interação entre os humanos e o espaço. Considerando a abordagem utilitária apresentada no item 4.1.2, subitem “a”, para o sistema costeiro e a crescente degradação da zona costeira, é decisiva a compreensão da evolução dos processos que ocorrem no espaço como uma consequência do comportamento coletivo (BOX, 2000). Na zona costeira, essa evolução parece acentuar-se em função de sua reduzida área, e do crescente aumento populacional.

Finalmente, o GCI apresenta uma considerável parcela de estudos no campo teórico, onde hipóteses sobre modelos de gerenciamento (e.g., gerenciamento adaptativo e gerenciamento participativo) e comportamentos dos elementos do sistema raramente são testados em prática. Sob esse aspecto, o MBA oferece seu caráter exploratório (item 2.2.2, subitem “a”) como uma ferramenta de apoio, viabilizando o teste dessas hipóteses, enquanto confere uma parcela de caráter experimental ao GCI.

4.2.1 Universo Virtual

De maneira simples e direta, os Modelos Baseados em Agentes são compostos de um universo virtual, geralmente uma matriz regular⁴¹, onde agentes interagem uns com os outros e com os atributos ambientais nele presentes. Para o modelo proposto, esses dois elementos podem ser considerados, de maneira análoga à realidade, como fruto de sua abstração por parte de estudiosos. Esse universo virtual é apresentado no item 2.2.1 como “*Computerrarium*” (JANSSEN; DE VRIES,

⁴¹ Ou matriz quadrada. Possui distâncias iguais nos dois eixos.

1998) devido ao seu isolamento como sistema, ao mesmo tempo que possibilita a observação de seu funcionamento.

Os agentes, assim como os atributos ambientais, podem ser representados de acordo com a dimensão adotada na simulação, podendo esta ser *uni* ou bidimensional⁴².

a) Analogia entre Agentes Inteligentes e Usuários

Pensar no sistema costeiro sob a abordagem utilitária apresentada no item 4.1.2, subitem “a”, permite o desenvolvimento de uma linha simples de raciocínio: se existem usos associados aos recursos naturais, é bastante lógico pensar que existam usuários. Estes, por sua vez, tendem a se organizar em grupos que compartilham e defendem interesses próprios, apresentando comportamentos bastante distintos uns dos outros. Finalmente, esses comportamentos se traduzem, de algum modo, na evolução da ocupação e uso da zona costeira.

Não parece ser difícil, após o exercício lógico do parágrafo anterior, partir para uma analogia entre o sistema costeiro, abordado sob o enfoque utilitário, e a modelagem baseada em agentes. Ao grupo de indivíduos que compartilham interesses, necessidades e padrões de comportamento codificados pelas regras propostas por Macy e Willer (2001) pode-se associar um grupo de agentes. Ou seja, cada grupo de agentes representará a abstração do comportamento de um grupo de usuários em relação ao ambiente e a outros grupos de usuários.

b) Analogia entre Atributos Espaciais e Recursos

Da mesma forma, a consideração da evolução do uso e da ocupação da zona costeira sob a abordagem utilitária requer a consideração dos recursos que, direta ou indiretamente, suprem as necessidades e expectativas futuras dos grupos de usuários. Estas constituem a “força motriz” que gera padrões de comportamento por parte dos usuários. Por analogia, esses recursos constituem os atributos ambientais presentes no universo virtual.

⁴² No levantamento bibliográfico desenvolvido ao longo deste trabalho, não foi encontrada nenhuma menção a modelos *tri* ou *n*-dimensionais.

c) Abstração da Realidade em um Universo Virtual

As analogias apresentadas nos itens “a” e “b” desta seção devem ser entendidas como fruto da abstração da realidade, e sua representação através de um mundo artificial. Esse procedimento é mais bem compreendido por meio do exemplo da Figura 25, desenvolvido a partir da abordagem utilitária anteriormente descrita. Nele, dois recursos naturais (atributos pesca e praia – Figura 25a) são analisados segundo os usos potenciais (Figura 25b) e os possíveis grupos de usuários (Figura 25c e d). Um modelo conceitual (Figura 25e) busca identificar e compor os elementos que irão, eventualmente, fazer parte do Modelo Baseado em Agentes (Figura 25f). É importante notar que o pescador e o turista, no exemplo, também apresentam relacionamento entre si, sendo esse um importante aspecto a ser incluído na simulação.

Naturalmente, a definição dos limites do sistema costeiro e a escala de trabalho dependem do problema que se busca estudar. Esse limite pode ser a extensão de uma praia, uma cidade, uma região que compreende vários municípios, ou mesmo um estado. Para cada escala adotada, no entanto, deve-se ter cuidado com a definição dos elementos e dos atributos mais apropriados ao objeto de estudo. Por exemplo, é totalmente inapropriado tentar simular o comportamento de onde um banhista irá permanecer numa praia (agente), considerando a existência de estradas intermunicipais (atributo espacial). Para esse problema, seria mais lógico considerar a distribuição de bares e estacionamentos ao longo da praia, locais com ou sem ondas e a localização de salva-vidas como importantes atributos espaciais que influenciam na decisão de onde o banhista irá permanecer na praia.

O sucesso do Modelo Baseado em Agentes depende da correta definição da escala de trabalho, dos elementos considerados importantes para esta escala e da correta definição dos atributos espaciais e codificação das regras de comportamento para os agentes.

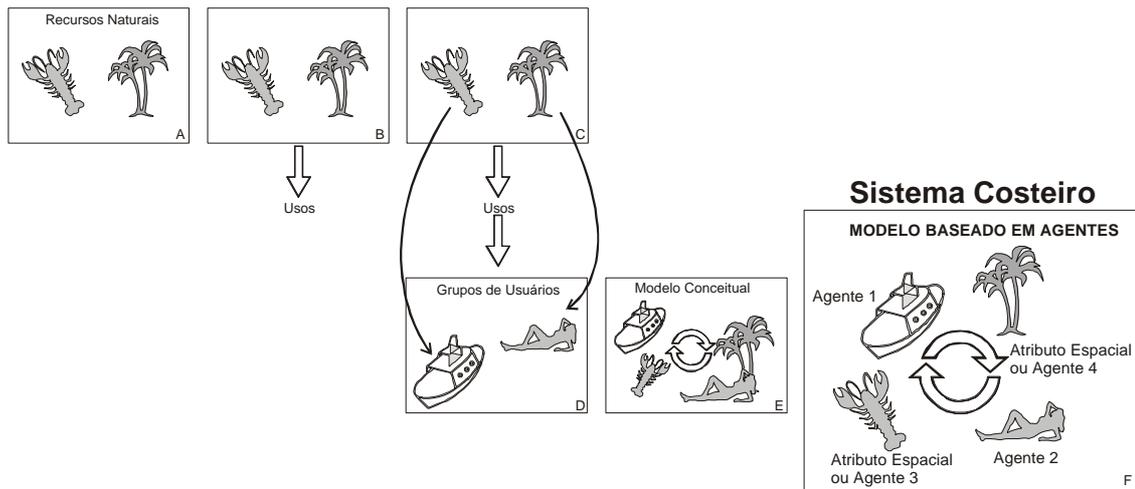


Figura 25. Exemplo do enfoque utilitário para com o sistema costeiro com vistas à elaboração do Modelo Baseado em Agentes.

4.2.2 Percepção, Comportamento e Lógica Difusa

Já é ponto pacífico, a esta altura do trabalho, a idéia de que um modelo não passa de uma abstração da realidade (item 4.2.1, subitem “a”), ou seja, de que se trata de uma descrição formal dos elementos essenciais de um problema (situação) de interesse. Considerando que esses elementos essenciais são exatamente aqueles que incluímos no sistema de interesse (estudo), pode-se pensar num modelo como uma descrição formal do sistema de interesse. A descrição pode ser física, matemática ou verbal, muito embora alguns pesquisadores se contraponham à idéia de modelos verbais, uma vez que palavras tendem a ser ambíguas.

Se para alguns essa ambigüidade é considerada indesejável, para outros ela constitui um requerimento à elucidação dos fenômenos cognitivos humanos e das regras de comportamento a eles atribuídas. A descrição verbal de um fenômeno ou processo é, na maioria das vezes, imprecisa, quando comparada ao rigor e formalismo de um modelo numérico. Porém, ela apresenta vantagens em relação ao modelo numérico quando o que se busca é a compreensão de seu funcionamento em linhas globais. A Lógica Difusa apresentada no 2.3 surgiu para contribuir na aproximação entre os modelos estritamente numéricos e os verbais, conseguindo incorporar o que há de melhor nesses dois enfoques. Ela viabiliza o tratamento da imprecisão dos modelos verbais, permitindo, assim, a sua codificação matemática.

Ao considerar o gerenciamento costeiro através da abordagem utilitária anteriormente descrita, o que se coloca como questão principal é a viabilidade do emprego de modelos verbais na explicitação da relação que existe entre recurso e usuários. Primordialmente, essa relação tem origem na percepção que cada pessoa tem das oportunidades oferecidas pelos recursos disponíveis, diante de suas necessidades e expectativas futuras. A percepção, nestes termos, deve ser encarada de modo subjetivo e não linear. Não menos importante, e com os mesmos tipos de características, encontra-se a elucidação do comportamento dos usuários, o qual pode ocorrer tanto em relação aos atributos espaciais quanto em relação aos demais tipos de agentes presentes na simulação⁴³ (item 4.2.1, subitem “c”). Em qualquer que seja a situação, a percepção e o comportamento apresentam grande apelo para a modelagem através da Lógica Difusa, assunto a ser apresentado nos itens a seguir.

a) Percepção Espacial

O termo “percepção espacial” se refere à forma como os usuários percebem os recursos distribuídos numa determinada área (Figura 26). Essa percepção não se restringe apenas a recursos, mas também a quaisquer atributos espaciais que possam, positiva ou negativamente, contribuir para a evolução dos processos que ocorrem no espaço (item 4.2).

A questão que surge neste momento refere-se ao conceito de atributo espacial. Para este trabalho, um atributo espacial pode ser todo item (ou elemento) que influencie um usuário no desenvolvimento de sua relação com o meio ambiente (espaço). Exemplos clássicos de atributos espaciais são centro da cidade e subúrbio, os quais atraem diferentes tipos de usuários. O centro pode estar longe, não muito longe ou próximo do usuário, segundo sua percepção. Esses valores, tipicamente lingüísticos, são passíveis de ser representados por meio da Lógica Difusa (Figura 27), como foi representado o atributo densidade populacional para o exemplo do item 2.3.2.

⁴³ Deve ser enfatizado que o enfoque deste trabalho é eminentemente espacial, sendo o relacionamento entre os agentes tratado de maneira indireta no modelo. Desse modo, tal assunto não é abordado em detalhes nesta tese.

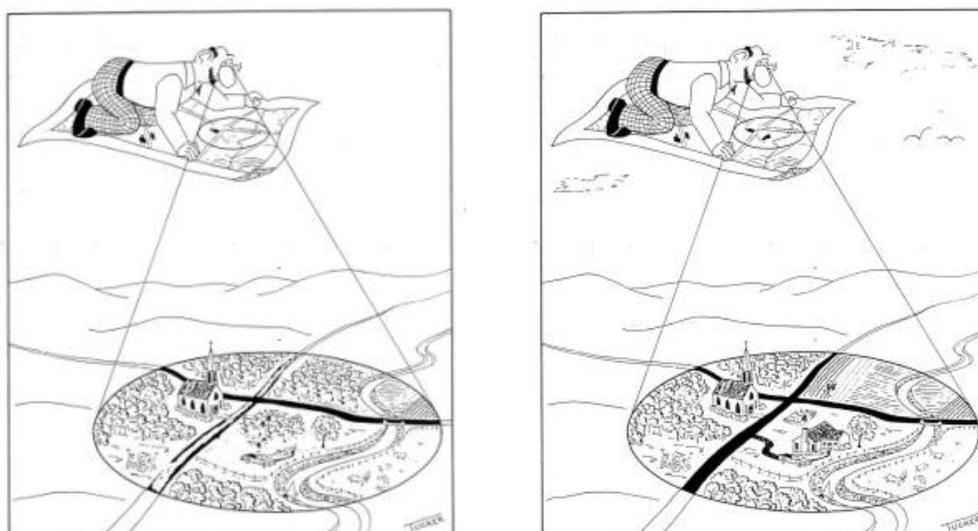


Figura 26. Percepção espacial e evolução de processos espaciais (MEYERS, 2000).

A percepção em um Modelo Baseado em Agentes não se encontra restrita à percepção dos atributos espaciais. Essa é uma característica particular dos modelos bidimensionais. A noção de quantidade (disponibilidade) de um recurso, por exemplo, é um fenômeno inerente ao indivíduo e não possui, *a priori*, distribuição espacial, mesmo que o recurso possua diferenças de abundância no espaço.

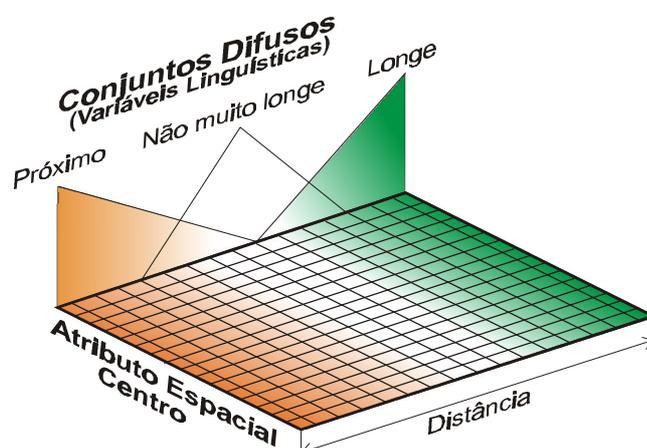


Figura 27. Representação do atributo centro através de conjuntos difusos.

b) Regras de Comportamento

Discutir o que vem a ser comportamento, ou *behaviorismo*, termo utilizado pela psicologia, encontra-se fora do escopo deste trabalho. Porém, é importante entender como esse termo é empregado em Modelos Baseados em Agentes. Inicialmente, a

consideração de estímulos (do meio) e respostas (manifestações comportamentais) constitui a base de sua aplicação. Aos estímulos do meio estão associados os atributos espaciais do modelo. Por consequência, espera-se que um agente perceba um ou mais atributos espaciais (receba um estímulo) e se manifeste ante esse estímulo. Essa manifestação é denominada de comportamento e, ao contrário do que se pode imaginar, ela não ocorre de maneira caótica. Em outras palavras, dependendo da escala, é possível identificar padrões de comportamento entre indivíduos que permitem o seu agrupamento; no caso do modelo proposto por este trabalho, em grupos de usuários.

As regras de comportamento, assim como os atributos espaciais considerados importantes por um indivíduo ou grupo, podem ser obtidas por meio de observações, aplicações de questionários, entrevistas, ou qualquer outra forma que possibilite sua elucidação. Contribui em sua representação a possibilidade de aquisição de informações necessárias à formulação das regras em linguagem natural e sua representação por meio de regras difusas (item 2.3.4, subitem “a”).

Vejamos o exemplo utilizado no item Percepção Espacial, em que o atributo centro foi identificado e valores de percepção foram atribuídos a ele. Longe, não muito longe ou próximo podem ser valores lingüísticos utilizados na representação de regras de preferência para localização de domicílio, por exemplo. Um indivíduo, ou grupo, pode ter preferência por morar longe do centro, sendo essa regra formalizada em linguagem natural da seguinte maneira: “indivíduo ou grupo A prefere morar longe do centro”.

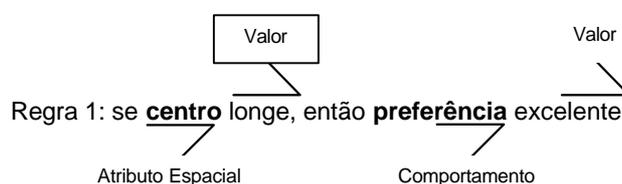


Figura 28. Elementos de uma regra de comportamento.

Essa regra pode ser codificada computacionalmente conforme ilustrado na Figura 28. Nessa representação, o atributo espacial da regra é o centro. Esse atributo possui um valor associado à percepção de distância, no caso, longe. O

comportamento propriamente dito é a preferência do indivíduo ou grupo de morar longe do centro. Essa preferência também possui um valor associado: excelente. Tanto o atributo espacial quanto a preferência podem fazer uso da Lógica Difusa para representação de seus valores (Figura 27). Já o comportamento em si, que surge da combinação desses elementos, é representado pelo mecanismo de inferência difusa, conforme apresentado no item 2.3.4 desta tese.

Não somente os atributos e o comportamento devem ser obtidos a partir dos indivíduos ou grupos. Os valores que eles podem assumir também necessitam ter origem no que se procura modelar. A questão que se impõe após a identificação desses itens (atributos, comportamento e seus respectivos valores) é como eles devem ser representados empregando-se conjuntos difusos. No caso do exemplo que vem sendo desenvolvido, quão longe longe é? Para determinados indivíduos ou grupos, longe pode representar dois quilômetros, enquanto, para outros, dez; ou mesmo representar diferentes conceitos, como, por exemplo, tempo ou custo de locomoção para chegar ao centro. Em qualquer um dos casos, cabe a quem modela a tarefa extrair essas informações e melhor representá-las.

Uma característica importante dos MBA é a possibilidade de que cada indivíduo ou grupo seja modelado individualmente, considerando as percepções e os comportamentos intrínsecos a ele. Em alguns casos, os agentes podem compartilhar mesmos atributos e valores, porém com comportamentos diferentes. Em outros, os comportamentos podem ser os mesmos, variando-se os valores. O que se vê na prática é a flexibilidade na combinação desses elementos, de modo a representar, o mais próximo possível, o comportamento do agente ao indivíduo/grupo a que aquele está associado. Como consequência, a mistura de diversos “tipos” de agentes em modelo aumenta seu grau de complexidade, pois a interação entre os agentes, muitas vezes, não é algo que foi modelado (ver propriedades emergentes no item 2.2.2, subitem “c”).

Modelos mais complexos de comportamento podem ser desenvolvidos também por meio da combinação de diversos atributos na elaboração das regras de comportamento. Por exemplo, o atributo centro, com preferência longe, poderia também considerar o atributo lagoa. Nesse caso, a preferência poderia ocorrer por

um local longe do centro e próximo a uma lagoa. Contudo, muito cuidado deve ser tomado, pois se espera que a complexidade do Modelo Baseado em Agentes ocorra nos resultados da simulação e não no que se assume sobre a realidade (AXELROD, 1997). Diante dessa afirmação, a utilização da Lógica Difusa fornece um importante mecanismo para simplificação das regras de comportamento que se busca modelar, ou mesmo do espaço que se busca representar.

4.3 PROTÓTIPO

O objetivo geral desta tese encontra-se orientado ao desenvolvimento de um modelo de simulação baseado em Agentes Inteligentes e Lógica Difusa para estudo do comportamento de usuários em zonas costeiras, visando à avaliação de suas percepções espaciais e distribuição no meio ambiente. Seguindo essa orientação, o protótipo testa a viabilidade do emprego de lógica e inferência difusa na modelagem de agentes inteligentes para exploração de processos espaciais na zona costeira. Traduzindo essas considerações em termos práticos, isso significa dizer que o modelo a ser implementado e testado encontra-se eminentemente embasado na percepção que indivíduos/grupos possuem ante os atributos espaciais e nos comportamentos que motivam a distribuição e ocupação destes no espaço.

4.3.1 Agentes Inteligentes Difusos

O que vem a ser um agente inteligente difuso não é uma questão difícil de ser respondida. Não é necessária a adoção de uma definição formal específica para agentes inteligentes difusos, uma vez que aquela apresentada no item 2.1.2 abrange todos os atributos de um agente, seja ele difuso ou não. A diferença que se apresenta reside no método empregado para a codificação de mecanismos de percepção e comportamento que compõem a agenda do agente, que são a lógica e a inferência difusa.

4.3.2 *Mapa mental*

Um agente difuso, conforme discutido no item anterior, apresenta a codificação de sua percepção e comportamento através de lógica e da inferência difusa.

Considerando que a inferência difusa ocorre por meio de processamento paralelo das regras (item 2.3.4, subitem “b”), na realidade o que se tem como resultado é uma síntese da preferência que um indivíduo ou grupo possui. Essa síntese recebe o nome de *mapa mental* (item 2.2.2, subitem “b”) e constitui uma estrutura bastante apropriada para estudos de natureza espacial, muito embora também possa ser aplicada a outros tipos de enfoque, não necessariamente no espaço (Figura 29).

A construção de um *mapa mental* para Modelos Baseados em Agentes Difusos bidimensionais ocorre a partir dos atributos espaciais representados em uma matriz de atributos. Essa matriz, denominada de *matriz de percepção*, possui distâncias absolutas medidas em todas as direções, a partir da definição dos limites do atributo espacial em estudo. A Figura 30 apresenta duas *matrizes de percepção*, uma para o atributo praia e outra para o centro de um balneário. Em azul escuro, encontra-se o limite do atributo, a partir do qual se medem as distâncias (*dégradé* de cores).

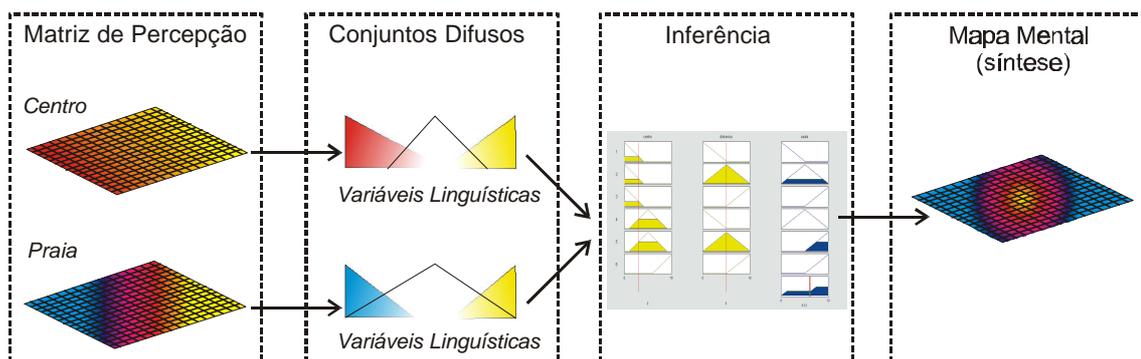
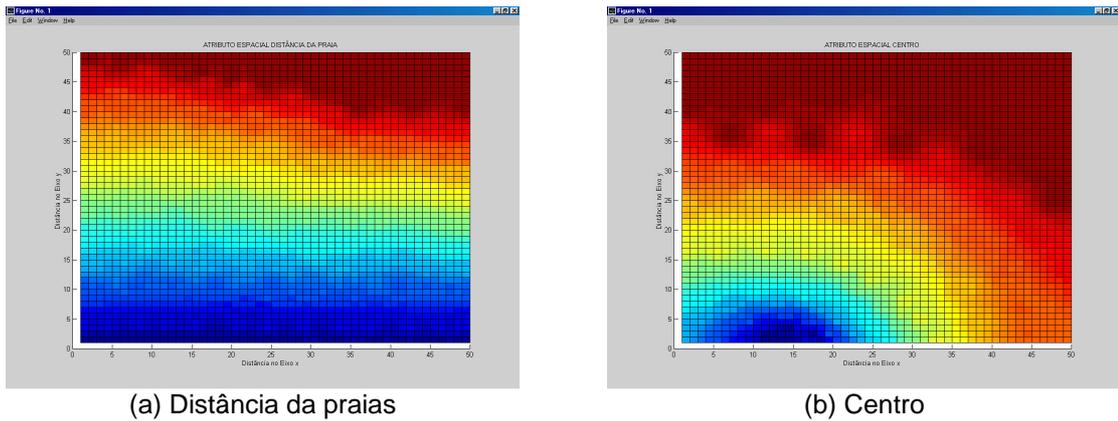


Figura 29. Etapas da construção de um *mapa mental*.

Os valores de distância presentes em cada célula da matriz constituem o valor de entrada para a máquina de inferência e compõem a reta-suporte para os conjuntos difusos (Figura 31). Logicamente, os conjuntos representam a percepção que um indivíduo ou grupo possui em relação ao atributo espacial. Desse modo, a distância da praia pode assumir valores linguísticos do tipo próximo à praia, sendo este conjunto definido por um intervalo de distância na reta-suporte (um exemplo detalhado desse procedimento é apresentado no item 4.3.2, subitem “a”).

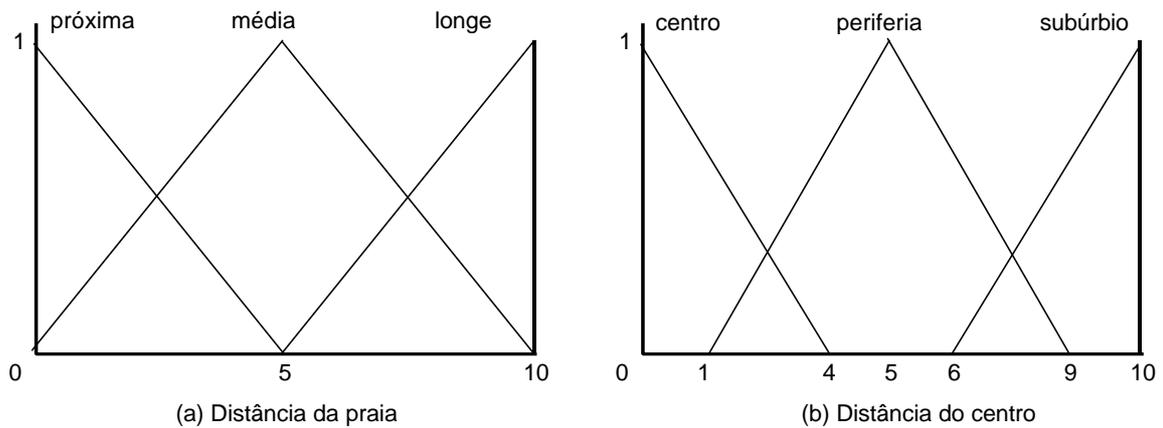


(a) Distância da praias

(b) Centro

Figura 30. Exemplo de *matriz de percepção espacial*.

Um segundo tipo de matriz encontra-se associado à síntese do comportamento anteriormente citado, recebendo esta o resultado da inferência difusa (Figura 32). Nessa matriz, de mesmas dimensões que as matrizes de atributos espaciais, tem-se a representação do *mapa mental* do agente (Figura 33).



(a) Distância da praia

(b) Distância do centro

Figura 31. Conjuntos difusos associados à *matriz de percepção*⁴⁴ para o exemplo.

É importante notar que cada agente tem seu próprio *mapa mental*, que representa mecanismos de percepção individuais (independentes), característica que viabiliza a elaboração de modelos com uma ampla diversidade de comportamentos.

⁴⁴ As equações que definem esses conjuntos encontram-se disponíveis no item 4.3.2.a.

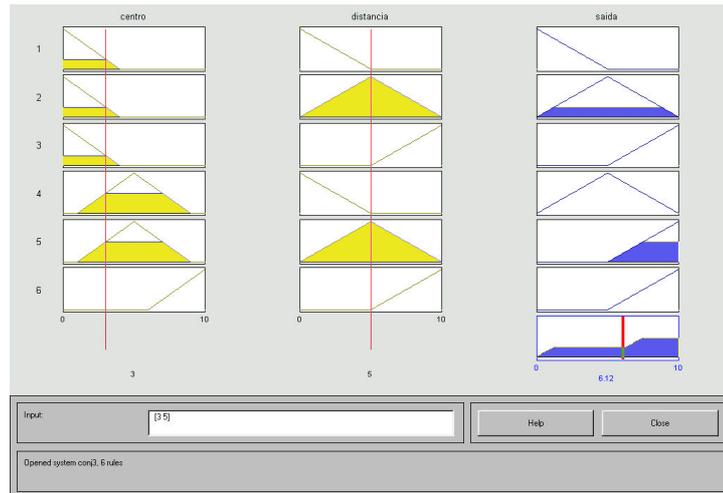
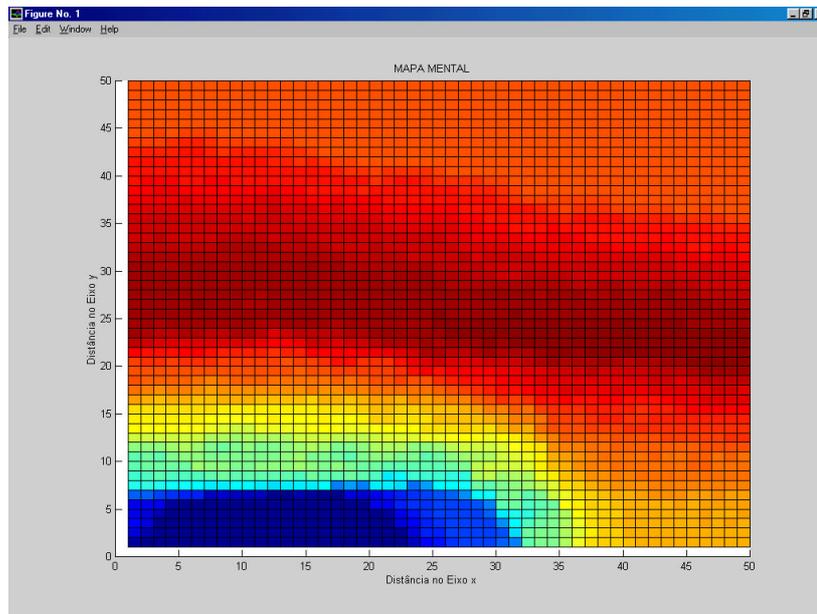


Figura 32. Máquina de inferência difusa.

a) Exemplo de Construção de um Mapa Mental

Para melhor compreensão do processo de construção do *mapa mental* do exemplo anterior, neste item é desenvolvido, a título de ilustração, o cálculo do valor da célula (30, 28), apresentada na Figura 33. O *mapa mental* dessa figura é formado por uma matriz de dimensão 50x50, a partir da inferência realizada com as matrizes centro e distância, de mesmas dimensões.



Mapa mental (atributos centro e distância da praia)

Figura 33. Matriz com o resultado da inferência difusa (mapa mental) para o exemplo. Em azul escuro, encontra-se a região de maior preferência. À medida que a distância aumenta, a preferência diminui, até seu valor mínimo, na região em vermelho.

Considerando-se a existência de mapas ou fotos aéreas, é possível, com o emprego de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), a identificação dos limites dos atributos espaciais da área de estudo e a construção de uma matriz de distâncias para cada atributo. Esses valores podem ou não ser normalizados visando à simplificação e melhor visualização do modelo. O procedimento aconselhável é a normalização com base no espectro de cores visíveis ao ser humano, ou seja, 256. Desse modo, a matriz original, formada por valores absolutos de distância, é substituída pela matriz normalizada através do seguinte índice de normalização:

$$h = \frac{\text{Distância}_{(m\acute{a}xima)}}{256}$$

A partir da nova matriz, são definidos os valores de percepção associados aos atributos espaciais. A definição do universo dos conjuntos difusos, na seqüência desse exemplo, é apresentada para intervalo máximo de 10 (em vez de 256), para efeitos de melhor compreensão dos procedimentos.

i. Definição do valor de pertinência para o atributo praia

$$m: X \rightarrow [0,1]$$

$$\text{pr}\acute{o}xima = \{x \mid 0 \leq x < 5\}$$

$$m_{\text{pr}\acute{o}xima} = \{-0,2x + 1 \text{ para } 0 \leq x < 5\}$$

$$\text{m}\acute{e}dia = \{x \mid 0 < x \leq 10\}$$

$$m_{\text{m}\acute{e}dia} = \left\{ \begin{array}{l} 0,2x \text{ para } 0 \leq x \leq 5 \\ 0,2x - 2 \text{ para } 5 < x \leq 10 \end{array} \right\}$$

$$\text{longe} = \{x \mid 5 < x \leq 10\}$$

$$m_{\text{longe}} = \{(0,2x - 1) \text{ para } 5 \leq x \leq 10\}$$

Essa representação matemática equivale aos três valores de percepção de distância associados ao conjunto difuso praia (próxima, média e longe), representado graficamente na Figura 31a.

ii. Definição do valor de pertinência para o atributo centro

$$m: X \rightarrow [0,1]$$

$$centro = \{x \mid 0 \leq x \leq 4\}$$

$$m_{centro} = \{-0,25x + 1 \text{ para } 0 \leq x \leq 4\}$$

$$periferia = \{x \mid 1 < x \leq 9\}$$

$$m_{periferia} = \left\{ \begin{array}{l} 0,25(x-1) \text{ para } 1 \leq x \leq 5 \\ -0,25(x-9) \text{ para } 5 < x \leq 9 \end{array} \right\}$$

$$subúrbio = \{x \mid 6 < x \leq 10\}$$

$$m_{subúrbio} = \{0,25(x-6) \text{ para } 6 \leq x \leq 10\}$$

Da mesma forma que para o conjunto praia, têm-se três valores de percepção de distância associados ao conjunto difuso centro (centro, periferia e subúrbio), conforme representado na Figura 31b. Mais valores podem ser identificados e inseridos no conjunto, dependendo da percepção atribuída ao grupo que se modela. No exemplo poderia existir um valor chamado próximo do centro ou muito longe do centro. Cabe ao modelador definir os valores de percepção.

Após a definição dos conjuntos relacionados aos atributos, é necessário definir as possíveis preferências a eles associadas. No caso do exemplo, esses valores são *excelente*, *bom* e *ruim*. Eles representam o conjunto de saída da inferência.

iii. Definição do valor de pertinência para os valores de preferência representando a saída

$$m: X \rightarrow [0,1]$$

$$excelente = \{x \mid 0 \leq x \leq 5\}$$

$$m_{excelente} = \{-0,2x + 1 \text{ para } 0 \leq x \leq 5\}$$

$$bom = \{x \mid 0 < x \leq 10\}$$

$$m_{bom} = \left\{ \begin{array}{l} 0,2x \text{ para } 0 \leq x \leq 5 \\ 0,2x - 2 \text{ para } 5 < x \leq 10 \end{array} \right\}$$

$$ruim = \{x \mid 5 < x \leq 10\}$$

$$m_{ruim} = \{0,2x - 1 \text{ para } 5 \leq x \leq 10\}$$

Esses valores podem ser representados graficamente de maneira análoga aos conjuntos praia e centro.

iv. Definição das regras de comportamento

Definidas as percepções e preferências, o significado comportamental é dado pela definição das regras que se aplicam a esses conjuntos. Essas regras, a exemplo da definição dos atributos, seus valores e preferências, são extraídas do que se busca modelar. Para o exemplo apresentado, procurou-se modelar a preferência de um turista que gosta de estar na praia, mas uma condição essencial é que essa praia seja urbanizada. Nesse caso, a condição excelente para ele é estar junto ao centro da área urbanizada, ao mesmo tempo que próximo à praia. A formalização dessa preferência comportamental encontra-se na Regra 1, abaixo ilustrada, sendo sua representação gráfica aquela representada na Figura 32, em amarelo.

1. Se (centro é centro) e (praia é próxima), então (saída é excelente).
2. Se (centro é centro) e (praia é média), então (saída é bom).
3. Se (centro é centro) e (praia é longe), então (saída é ruim).
4. Se (centro é periferia) e (praia é próxima), então (saída é bom).
5. Se (centro é periferia) e (praia é média), então (saída é ruim).
6. Se (centro é subúrbio) ou (praia é longe), então (saída é ruim).

v. Cálculo das pertinências para os valores dos atributos

Considerando os valores 5 e 3 para os atributos praia e centro, respectivamente, para a célula_(30, 28), é possível identificar quais regras de comportamento se aplicam a ela. Para essa dupla de valores, as regras 2 e 5 são “disparadas” (Figura 32), pois elas pertencem aos intervalos apresentados nos itens i e ii desta seção. Na seqüência, é necessário calcular suas respectivas pertinências para compor os valores dos conjuntos de entrada para a inferência:

$$\text{praia } (30, 28) = 5$$
$$m_{\text{média}} = \{0,2 * 5\} = 1$$

$$\text{centro } (30, 28) = 3$$
$$m_{\text{centro}} = \{-0,25 * 3 + 1\} = 0,25$$
$$m_{\text{periferia}} = \{0,25(3 - 1)\} = 0,5$$

vi. Cálculo do valor de saída da célula (30, 28)

A partir das pertinências obtidas no cálculo do item v, executa-se uma operação maxmin (item 2.3.4, subitem “b”) para a obtenção do valor difuso de preferência. Ou seja, existe uma transferência do menor valor de pertinência dos conjuntos de entrada para o conjunto de saída. Na seqüência, é realizada a união dos conjuntos de saída que tiveram as regras “disparadas”. A operação maxmin é representada matematicamente da seguinte maneira:

Cálculo dos mínimos valores:

$$R_j(x, y) = \min[\mathbf{m}_j(x), \mathbf{m}_j(y)]$$

onde:

R_j representa o resultado da inferência para uma regra j qualquer;

(x, y) o valor de entrada e saída, respectivamente;

$\mathbf{m}_j(x)$ a pertinência encontrada para o valor de entrada; e

$\mathbf{m}_j(y)$ a pertinência encontrada para o valor de saída.

Com os valores de pertinência obtidos para as regras disparadas, pode-se então calcular o mínimo para cada regra.

$$\text{Regra 2: } R_2(\text{média}, \text{centro}, \text{bom}) = \min[(\text{média}), 0,25(\text{centro}), 0,25(\text{bom})]$$

$$R_2(\text{média}, \text{centro}, \text{bom}) = 0,25(\text{bom})$$

$$\text{Regra 5: } R_5(\text{média}, \text{periferia}, \text{ruim}) = \min[(\text{média}), 0,5(\text{periferia}), 0,5(\text{ruim})]$$

$$R_5(\text{média}, \text{periferia}, \text{ruim}) = 0,5(\text{ruim})$$

Isso equivale a dizer que para a Regra 2 é transferido para o conjunto de saída “bom” o valor de pertinência 0,25, obtido pelo mínimo valor de pertinência entre os conjuntos praia e centro. O mesmo se aplica para a regra 5, sendo encontrado o valor de pertinência 0,5 para o conjunto de saída “ruim”. Essa operação pode ser representada graficamente conforme apresentado na Figura 32. Nesta figura, em amarelo, encontram-se os conjuntos que compõem a entrada da regra, enquanto o resultado da inferência é apresentado à direita, em azul.

Cálculo do máximo valor:

$$R = \max[R_j(x, y)]$$

onde:

R representa o resultado final da inferência;

$R_j(x, y)$ representa o resultado da inferência para cada regra disparada;

Com os resultados da inferência para cada regra disparada, pode-se então calcular o máximo.

$$R = \max[0,25(bom), 0,5(ruim)]$$

Em termos gráficos, essa operação representa a união dos dois conjuntos de saída (Figura 34a).

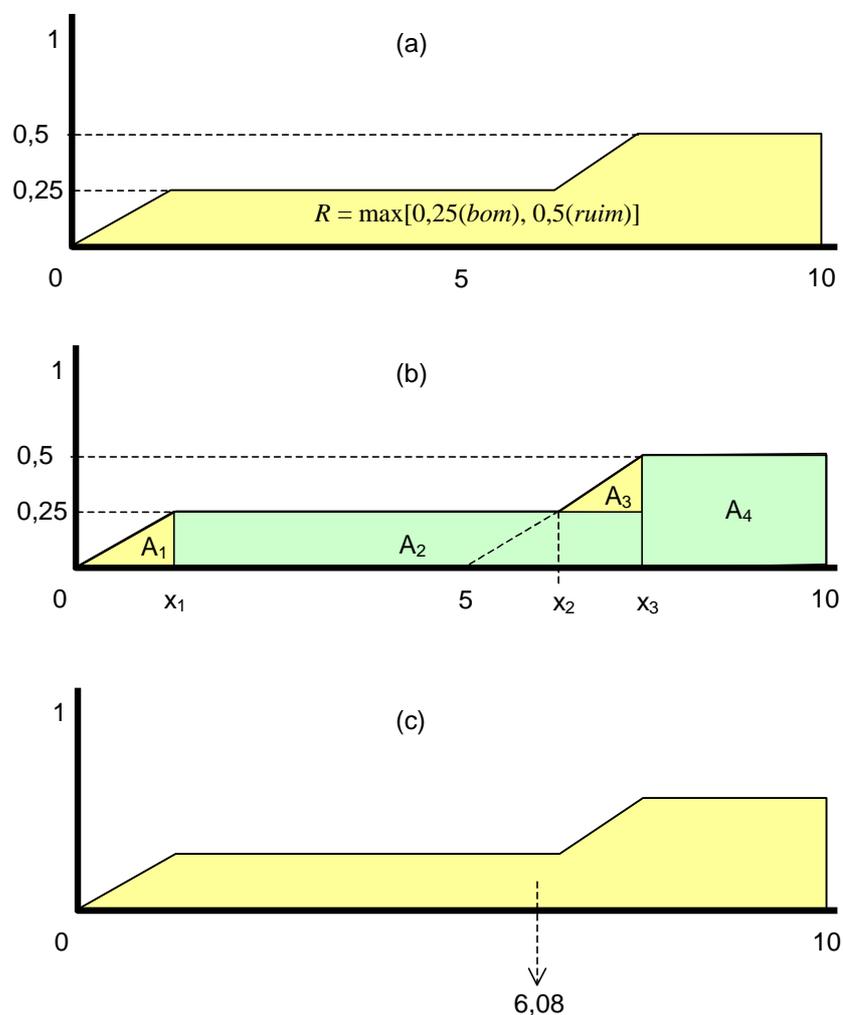


Figura 34. Defuzzificação através do método do centróide.

Cálculo do centróide

O último passo para a obtenção do valor de saída da célula_(30,28) consiste em transformar o resultado da operação maxmin (valor difuso) em um valor numérico

convencional. Esse processo é denominado defuzificação (item 2.3.4, subitem “c”), e existem diversos métodos empregados (e.g., interpolação e centróide). Este trabalho adota o método do centróide, o que implica a identificação do centro de gravidade da figura resultante da operação maxmin (Figura 34a). A projeção desse ponto sobre a reta-suporte do conjunto de saída (eixo x) determina o valor convencional de saída (Figura 34c).

A determinação do centróide para uma figura regular complexa é feita através de sua simplificação em quadrados e triângulos (Figura 34b). A partir dessa simplificação, aplicam-se as seguintes fórmulas para calcular os componentes x e y do centróide:

$$\bar{x} = \frac{\sum_i^n A_i * c_i}{A_{total}} \quad (\text{eq. 1})$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_i^n A_i * c_i}{A_{total}} \quad (\text{eq. 2})$$

onde:

- \bar{x} é a componente x do centróide;
- \bar{y} é a componente y do centróide;
- A_i é a área da figura i ;
- c_i é o componente x ou y do centróide da figura i , respectivamente.

O componente x ou y do centróide (c_i) pode ser obtido por meio das seguintes fórmulas:

$$c_i = \frac{L}{2} \text{ para um quadrado;} \quad (\text{eq. 3})$$

$$c_i = \frac{2}{3} L \text{ para um triângulo.} \quad (\text{eq. 4})$$

onde:

L é o lado do quadrado ou triângulo no eixo x ou y .

Como o que interessa é a componente x do centróide, uma vez que é este o valor *crisp* da inferência, não é necessário calcular o valor da componente.

Tendo sido definidos os procedimentos, aplica-se, então, a **eq. 1** para o cálculo do valor de saída para a célula_(28,30):

$$\bar{x} = \frac{(A_1 * c_1) + (A_2 * c_2) + (A_3 * c_3) + (A_4 * c_4)}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}$$

Considerando que A_2 e A_4 são quadrados, e A_1 e A_3 são triângulos, aplicam-se as **eq. 3** e **4**. Porém, deve-se tomar cuidado para que a posição relativa à reta-suporte não seja perdida. Assim:

$$A_1 * c_1 = \left(\frac{(x_1 - x_0) * 0,25}{2} \right) * \left(\frac{2(x_1 - x_0)}{3} \right)$$

$$A_2 * c_2 = ((x_3 - x_1) * 0,25) * \left(\frac{(x_3 - x_1)}{2} + x_1 \right)$$

$$A_3 * c_3 = \left(\frac{(x_3 - x_2) * 0,25}{2} \right) * \left(\frac{2(x_3 - x_2)}{3} + x_2 \right)$$

$$A_4 * c_4 = ((x_4 - x_3) * 0,5) * \left(\frac{(x_4 - x_3)}{2} + x_3 \right)$$

Pela equação dos conjuntos de saída (item iii), pode-se obter os valores de x_1 , x_2 e x_3 :

x_1 é o ponto onde $y_1 = 0,25$ para a equação $y_1 = 0,2x$

$$x_1 = 0,25 / 0,2 = 1,25$$

x_2 é o ponto onde $y_2 = 0,25$ para a equação $y_2 = 0,2x - 1$

$$x_2 = 0,25 / 0,2 + 1 = 6,25$$

x_3 é o ponto onde $y_3 = 0,5$ para a equação $y_2 = 0,2x - 1$

$$x_2 = 0,5 / 0,2 + 1 = 7,5$$

Considerando ainda que $x_0 = 0$ e $x_4 = 10$, tem-se:

$$A_1 * c_1 = \left(\frac{(1,25) * 0,25}{2} \right) * \left(\frac{2(1,25)}{3} \right) = 0,1302 ;$$

$$A_2 * c_2 = ((7,5 - 1,25) * 0,25) * \left(\frac{(7,5 - 1,25)}{2} + 1,25 \right) = 6,8359 ;$$

$$A_3 * c_3 = \left(\frac{(7,5 - 6,25) * 0,25}{2} \right) * \left(\frac{2(7,5 - 6,25)}{3} + 6,25 \right) = 1,1067 ; e$$

$$A_4 * c_4 = ((10 - 7,5) * 0,5) * \left(\frac{(10 - 7,5)}{2} + 7,5 \right) = 10,9375 .$$

Desse modo:

$$\bar{x} = \frac{19,010}{3,125} = 6,08$$

$\bar{x} = 6,08$ é o valor do *mapa mental* da célula_(30, 28).

4.3.3 Agenda

A definição de agentes (item 2.1.2) apresenta o termo “*agenda*” para designar toda e qualquer ação que um agente deve cumprir ao longo de sua existência. As ações podem ser desencadeadas por alterações do meio, interações com outros agentes, ou por uma variável qualquer, como tempo, por exemplo. Por consequência, um agente é modelado de forma a cumprir com as metas codificadas em sua agenda.

Para o protótipo proposto, essa agenda constitui-se numa simples busca pelo local de sua preferência, tendo em conta o seu *mapa mental*. Ou seja, um agente irá procurar, ao longo de uma simulação, pelo local que melhor se enquadre em sua percepção e comportamento.

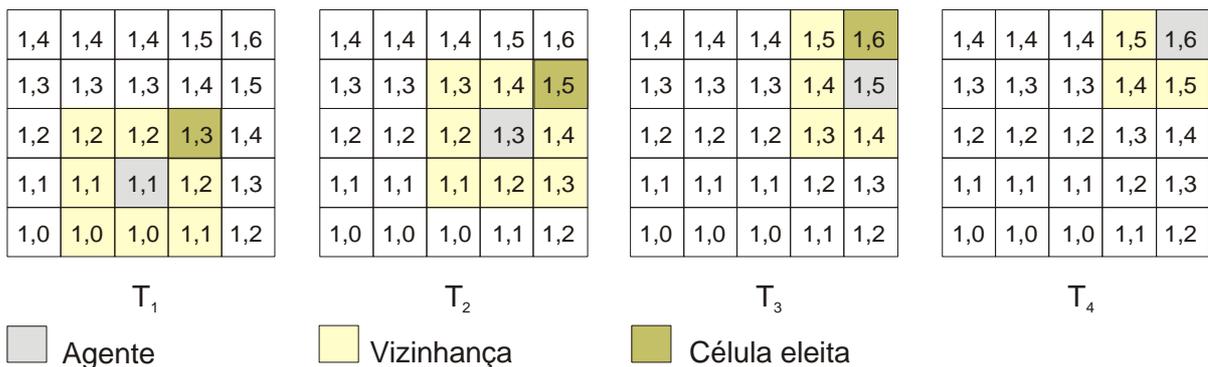


Figura 35. Exemplo de agenda com base em preferência.

Como o *mapa mental* é representado em uma matriz bidimensional, a busca pela preferência ocorre com base no valor das células vizinhas (Figura 35). O agente elege a célula de maior valor, passando a ocupá-la no passo seguinte da simulação.

Esse procedimento ocorre até que o agente encontre uma vizinhança onde ele se estabilize, cumprindo, naquele momento, com sua agenda. No caso do maior valor se repetir na vizinhança, o critério é a escolha aleatória da célula eleita.

4.3.4 Implementação do Protótipo

Para provar a viabilidade do emprego de Modelos Baseados em Agentes Inteligentes Difusos, foram desenvolvidos dois protótipos.

a) Versão MATLAB

O primeiro protótipo foi implementado no MATLAB[®] e teve como objetivo explorar alguns conceitos relacionados à lógica e à inferência difusa, e aos aspectos práticos referentes ao seu emprego em Modelos Baseados em Agentes. Esse protótipo se beneficiou da ferramenta *fuzzy toolbox* do MATLAB[®], que facilitou a codificação e o teste do modelo proposto. As figuras encontradas ao longo do exemplo apresentado no item 4.3.2, subitem “a”, são, em sua maioria, derivadas dos testes com esse protótipo.

Apesar de ter atendido às necessidades a que se propôs, o processamento interpretado do MATLAB[®] inviabilizou, devido ao longo tempo requerido para a simulação, o seu emprego em matrizes de atributos com dimensões acima de 50x50. Não apenas o aumento das dimensões causou retardo de tempo de processamento. A adição de uma nova matriz de atributos, mesmo com dimensões menores que 50x50, brindou o protótipo com o mesmo problema.

b) Versão C++

Verificada a viabilidade do emprego da lógica e da inferência difusa em Modelos Baseados em Agentes, surgiram novos questionamentos sobre a aplicação do modelo em dados reais, ou seja, mais complexos que os trabalhados na versão MATLAB[®]. O primeiro aspecto considerado no desenvolvimento desse protótipo foi o processamento pesado verificado na primeira versão. O segundo, a necessidade de manuseio de matrizes de atributos espaciais de dimensões similares às aquelas encontradas em imagens de satélite ou fotografias aéreas. Ou seja, acima de 300x300.

O terceiro aspecto considerado foi a eliminação da codificação do modelo diretamente no código-fonte, como ocorria na versão MATLAB[®]. Esse item se mostrou importante por conferir flexibilidade e rapidez na condução de testes mais avançados, além de possibilitar a distribuição do protótipo para pesquisadores que não são familiares à programação.

A disponibilidade de um algoritmo de inferência difusa em C++ (CABRAL, 1994) foi o quarto aspecto, que definiu a linguagem de programação para esse protótipo. O acesso a este algoritmo possibilitou a reorientação de valiosas horas de trabalho para o desenvolvimento do protótipo, incluindo a interface do sistema.

Esses aspectos conferiram ao protótipo o perfil de *shell* para simulação (Figura 36), configurável através de *script* (Anexo B).

Características do Simulador

- **Matriz de percepção:** estas matrizes são inseridas no simulador a partir de um sistema de informações geográficas (ArcView[®]). A adoção de um SIG expande os recursos associados ao simulador, pois, além de possibilitar análises espaciais para a área em estudo, viabiliza ainda análises com os resultados obtidos. O simulador permite a incorporação de n matrizes de percepção, o que pode ser realizado de modo incremental, à medida que novos agentes são incluídos na simulação.

- **Agentes:** os agentes podem ser modelados e inseridos na simulação de modo incremental, assim como as matrizes. O número e o tipo de agente pode ser alterado, não havendo limites. As propriedades dos agentes podem ser definidas por:

Comportamento dos Agentes: modelado através de lógica e inferência difusa. O comportamento pode ser facilmente alterado entre uma simulação e outra;

Visão dos Agentes: a visão dos agentes, neste protótipo, é composta da vizinhança de Moore (CHOPARD, 2002 – comunicação oral). Ou seja, o agente vê a vizinhança imediata constituída pelas oito células que o cercam (Figura 35);

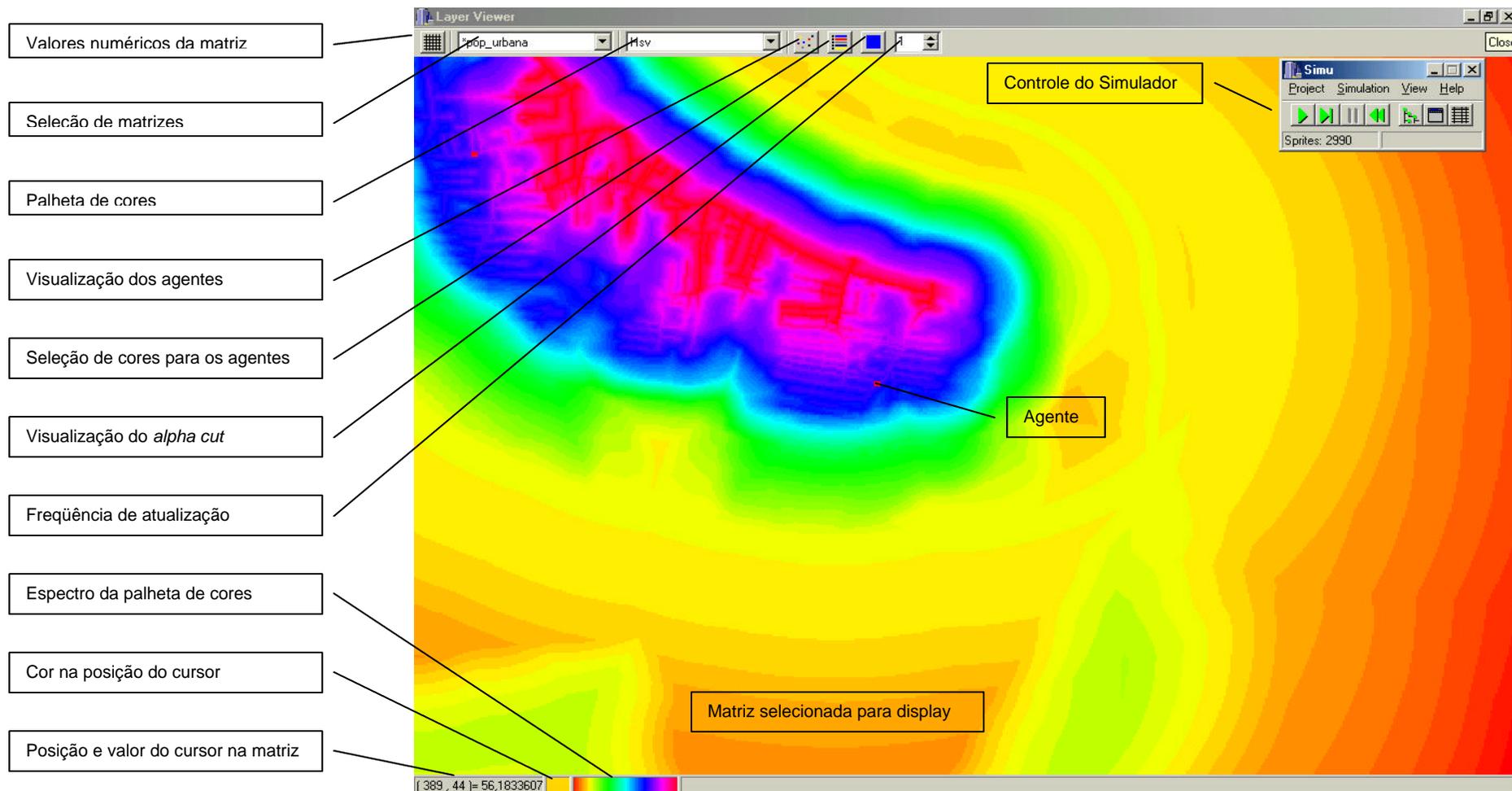


Figura 36. Interface do Simulador.

Impacto dos Agentes: o simulador considera que a presença de um agente em uma célula pode causar, ou não, impacto em sua vizinhança. Esse impacto é definido pelo modelador e pode assumir qualquer valor do intervalo da reta-suporte do conjunto de saída;

Alpha cut: uma das propriedades da Lógica Difusa é o *alpha cut*. Seu emprego no simulador torna a agenda do agente mais ou menos flexível ao atribuir, a partir de certo grau de pertinência, o valor que somente seria a pertinência máxima.

- **Passo de Tempo:** o modelo proposto não trabalha associado a passos de tempo que correspondem ao tempo real. Desse modo, o final da simulação é definido pela estabilização dos agentes. A associação ao tempo é feita indiretamente, através da projeção de aumento populacional para a área de estudo.

CAPÍTULO

5 ESTUDO DE CASO

“Management consists of doing more than correcting gross and highly visible deficiencies. Good management consists of receiving an early warning of malfunctions and correcting deficiencies before they become serious...”

John Cairns, 1992

5.1 MODELO BASEADO EM AGENTES DIFUSOS

A comprovação da viabilidade do emprego de Modelos Baseados em Agentes Difusos em processos espaciais, para esta tese, é realizada por meio de um estudo de caso. Contudo, antes de desenvolvê-lo, dois temas devem ser abordados: (a) como construir um Caso⁴⁵ para esse tipo de enfoque, visando à simulação no protótipo desenvolvido (item 4.3.4, subitem “b”); e (b) como testar os resultados obtidos nas simulações, para validar o Caso e, por extensão, o modelo conceitual proposto para a ferramenta.

5.1.1 Etapas para a Construção de um Caso

A Figura 37 apresenta, em linhas gerais, os passos que compreendem a construção de um estudo de caso e a sua subsequente simulação. Apesar de estarem apresentadas em série, as etapas podem ocorrer simultaneamente. Segue uma breve descrição de cada etapa.

⁴⁵ Para evitar confusão entre o emprego do termo “modelo conceitual”, que se refere à concepção do Modelo Baseado em Agentes Difusos, e o modelo para o estudo de caso, este último é referido, ao longo deste capítulo, como Caso.

a) Etapa I: Definição do problema e área de estudo

A primeira etapa para o desenvolvimento de um Caso consiste na definição do problema (e.g., ocupação de mangues, desenvolvimento de um balneário, etc.), e área em que o estudo será conduzido.

b) Etapa II: Desenvolvimento do caso

A definição do problema e da área delimitam o sistema, o que permite que o problema seja analisado sob o enfoque sistêmico e utilitário apresentado no item 4.1. O resultado desta análise é o Caso (modelo conceitual do sistema costeiro em estudo). Nele é possível identificar usuários e atributos espaciais a serem incluídos na simulação.

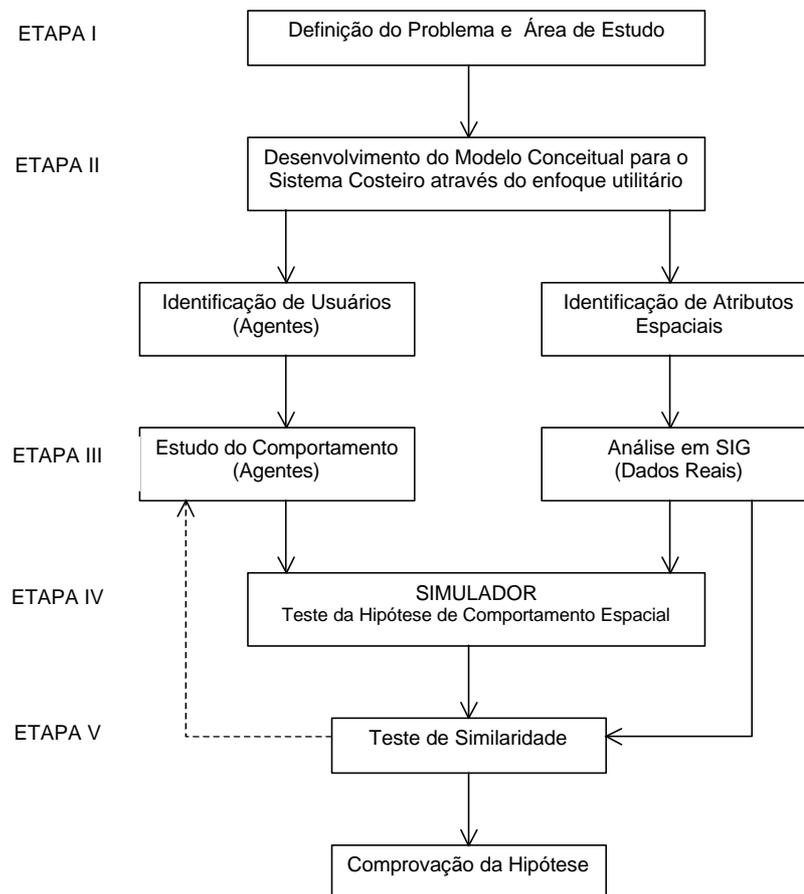


Figura 37. Esquema com as etapas para a construção de um Caso.

c) Etapa III: Estudo do Comportamento e dos Atributos Espaciais

Através de um SIG, o uso e a ocupação do solo são analisados considerando-se as características e os elementos incluídos no sistema em estudo, o que possibilita a geração de hipóteses sobre o comportamento espacial dos usuários e sua relação com os atributos da área de estudo. Somam-se a esse tipo de informação aquelas obtidas por meio de questionários, entrevistas, observação de campo, etc. O resultado dessa etapa se resume na formulação da hipótese sobre o comportamento espacial dos usuários diante dos atributos considerados importantes.

d) Etapa IV: Simulador

Na quarta etapa, os atributos espaciais e o comportamento dos grupos de usuários são preparados para a simulação. Os atributos espaciais passam a ser representados em *matrizes de percepção* (item 4.2.2, subitem “a”), enquanto percepção e comportamento são codificados em regras difusas (item 4.2.2, subitem “b”). Informações como impacto causado por um grupo de usuários e número de agentes, por exemplo, são consideradas na elaboração do *script* da simulação (item 4.3.4, subitem “b”).

e) Etapa V: Teste de Similaridade

Um teste de similaridade (descrito no item 5.1.2) deve ser conduzido de modo a verificar se o resultado da simulação apresenta correspondência com os dados reais. A comprovação da hipótese sobre o comportamento espacial se dá com a verificação da similaridade. Do contrário, comportamento, importância do atributo e percepção dos usuários devem ser revistos.

5.1.2 Teste de Similaridade

A capacidade de identificar a similaridade entre objetos e situações é uma propriedade inata dos seres humanos, de crucial valor para a formulação de expectativas e previsões. Para Holt (2000), a capacidade de gerar julgamentos similares é uma ferramenta poderosa nos estudos associados à percepção e à cognição humanas, representando um papel importante no desenvolvimento de

teorias relacionadas à representação do conhecimento humano, comportamento e resolução de problemas.

O Modelo Baseado em Agentes Difusos proposto neste trabalho busca atingir um certo grau de similaridade com a realidade, de modo a possibilitar previsões ante as alterações dos atributos espaciais e das expectativas dos usuários da zona costeira (comportamento). Considerando-se que a simulação tem caráter eminentemente espacial, é necessário determinar se os resultados obtidos nela guardam algum tipo de relação com a distribuição encontrada nos dados reais. É importante notar, ainda, que esse tipo de simulação, em princípio, não busca alcançar com exatidão a distribuição dos agentes encontrada em situações reais. Ele visa, no entanto, a uma aproximação da distribuição real, isto é, se os atributos, conjuntos e comportamento modelados guardam similaridade com a realidade. A comprovação da existência de similaridade entre dados reais e simulados indica que o modelo está coerente com a visão (hipótese) que o pesquisador tem sobre as necessidades de grupos de usuários e seus comportamentos (distribuição espacial). Ou seja, (a) que o modelador captou os atributos espaciais que cada grupo de usuários considera importante para suprir suas necessidades; (b) que os conjuntos difusos e seus valores para os atributos espaciais aproximam-se da percepção espacial de cada grupo de usuários; e (c) que as regras de inferência difusa podem gerar distribuições coerentes com as encontradas na realidade.

a) Similaridade Espacial

Para determinar o grau de similaridade que existe entre os dados reais e os encontrados na simulação, este trabalho utiliza a análise de sobreposição espacial (*overlay*), procedimento facilmente realizado num SIG. Nele, a similaridade é verificada por meio da comparação entre a distribuição dos dados reais, com a distribuição espacial dos agentes encontrada ao final da simulação. Emprega-se uma operação de intersecção da área total ocupada pelo dado real, com a área total ocupada pelos agentes (Figura 38). Assim, quanto mais próximo for o valor da área de intersecção do valor da área real, mais similares os resultados serão. Esse procedimento é denominado cálculo do índice de similaridade.

b) Cálculo do Índice de Similaridade Espacial

O Índice de Similaridade é expresso através do percentual de similaridade entre os dados reais e os simulados, e é obtido a partir das áreas dos dados reais e simulados pela seguinte equação:

$$S_r = \frac{(A_r \cap A_s) * 100}{A_r}$$

onde:

- S_r é o Índice de Similaridade para um raio r qualquer;
- A_r é a área real para um raio r qualquer; e
- A_s é a área simulada para um raio de 10 metros.

Considerando-se que um agente/usuário é representado por um ponto na matriz, seria impossível determinar a intersecção das áreas ocupadas. Para resolver esse problema e poder aplicar o Índice, a alternativa apresentada é a aplicação da operação de *buffer*. Essa operação é bastante comum em análises espaciais e consiste na geração de um limite externo a um objeto, a partir de uma determinada distância ou raio (Figura 38a). Com o emprego desse artifício, é possível aplicar o cálculo do Índice com base na área do *buffer* criado.

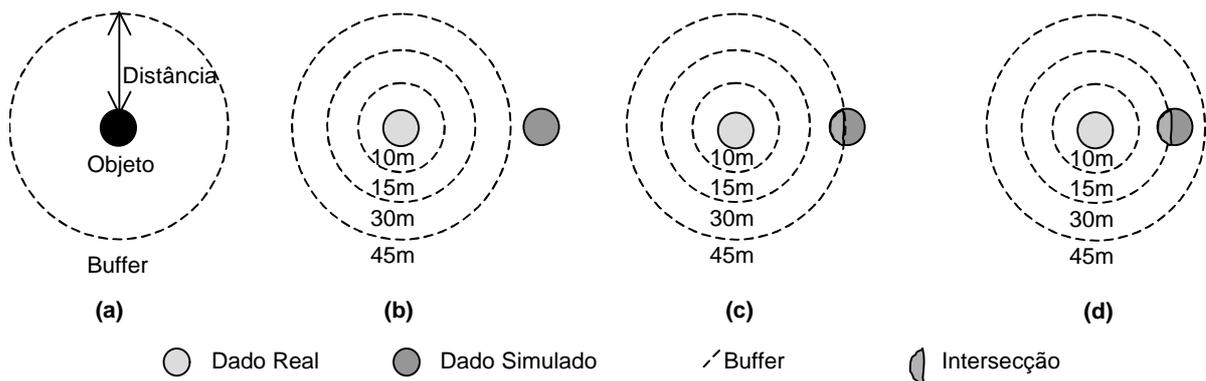


Figura 38. Representação gráfica do teste de similaridade. (a) Geração de um *buffer* a partir de um objeto e uma distância (raio) qualquer; (b) exemplo de operação de intersecção vazia para qualquer índice; (c) intersecção para o índice 45 (S_{45}); e (d) 30 (S_{30}).

Para proporcionar uma análise mais apurada do Índice de Similaridade Espacial, ela pode ser desenvolvida para quatro diferentes raios (10, 15, 30 e 45 metros). Assim,

o procedimento adotado consiste em fixar o raio do *buffer* para o dado simulado em 10 metros, calculando-se os Índices para as distâncias de *buffer* propostas para o dado real (Figura 38b, c e d). Ou seja, são criados quatro Índices de Similaridade Espacial: S_{10} , S_{15} , S_{30} e S_{45} . A estes índices correspondem, respectivamente, as seguintes áreas de *buffers*: 315, 707, 2.827 e 6.361 m². Considerando-se que o tamanho normal de um lote residencial varia entre 300 e 800 m², os índices S_{10} e S_{15} guardam estreita correspondência com a ocupação real.

5.2 PROCESSO DE OCUPAÇÃO DA ZONA COSTEIRA

5.2.1 Gerenciamento Costeiro e Legislação Ambiental

Uma porção significativa dos problemas de qualidade ambiental e ocupação que ocorrem na zona costeira existe em função da ausência de um controle efetivo do Estado sobre seus diferentes usos e ocupação. Esse controle, em linhas gerais, reside na aplicação de legislações e regulamentações ambientais que, embora não sejam perfeitas em seus conteúdos, representam diretrizes de ordenamento de ocupação e uso dos recursos costeiros. Essas diretrizes refletem políticas e planos governamentais estratégicos.

Para o setor público, uma legislação consiste num conjunto de regras que guiam o comportamento de todos os membros da sociedade em relação aos bens comuns, saúde e segurança pública. Já para cada indivíduo da sociedade, ela representa um conjunto de regras que restringem ou asseguram direitos individuais. Contudo, indivíduos são, por natureza, egocêntricos e reducionistas; ou seja, é da natureza humana maximizar o ganho individual sobre o coletivo (JENTOFT *et al.*, 1998). Se todos se comportassem voluntariamente de acordo com valores e interesses comuns, não haveria necessidade de políticas públicas, nem de governos ou mesmo de legislações (ANDERSON, 1984 *apud* ORBACH, 1997).

Sob essa ótica, políticas e planos governamentais vêm sendo ineficazes na condução de medidas orientadas à proteção do meio ambiente natural, principalmente quando há ausência de legislações e regulamentações, ou simplesmente quando não há implementação prática de mecanismos legais, de

forma a prevalecer a impunidade a eventuais infratores. Mesmo diante desse quadro, e sob o reconhecimento de que não se resolvem diretamente conflitos entre usuários (e usos), as legislações e regulamentações podem vir a se tornar poderosas ferramentas pró-ativas de gestão ambiental (WCC, 1993).

Se, por um lado, legislações e regulamentações podem ser consideradas como ferramentas de gestão ambiental, por outro, argumenta-se que muitas leis não estão apropriadas ao momento em que a sociedade contemporânea vive. Para piorar a situação, existe uma disputa fundamental entre ciência e lei, uma vez que a primeira é considerada mais dinâmica e orientada para o futuro, enquanto a segunda, de acordo com essa perspectiva, está voltada ao passado. No entanto, uma considerável convergência de idéias vem ocorrendo sob o tema de como as diferentes nações do planeta podem melhorar seus sistemas de proteção e manutenção da qualidade ambiental (HAGENAH, 1999). Essas idéias consideram um enfoque mais dinâmico e sistêmico para a interação entre sociedade e meio ambiente natural. O que se busca com essas idéias é uma evolução denominada “reinvenção” ou “reforma” do modelo legal em relação à sua eficiência em proteger e manter a qualidade do meio ambiente natural (HAUSKER, 1999). Porém, para que isso ocorra, é necessário compreender as formas como o ser humano se relaciona com o meio ambiente.

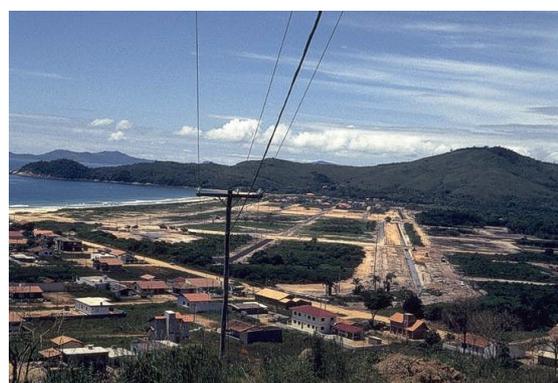
5.2.2 Comportamento de Grupos de Usuários Costeiros

A ocupação e utilização da zona costeira no Brasil vem ocorrendo de forma desordenada, e por muitas vezes caótica (ROCHA; LOPES, 1996; POLETTE, RAUCCI; CARDOSO, 2000; CALLIARI *et al.*, 2001). Uma considerável parcela de responsabilidade por essa situação pode ser atribuída ao desrespeito às leis e regulamentações vigentes por parte de indivíduos, ou grupos de indivíduos (RUFINO, 1990), enquanto outra parcela se refere à adequação das leis a uma visão sistêmica e funcional do meio ambiente natural, conforme já apresentado. Aparentemente, existem padrões de desobediência legal que podem ser associados a diferentes grupos de usuários (comportamento), como exemplificado na Figura 39. Contudo, não existem estudos que tratem desse assunto, principalmente quando é considerada a dimensão espacial que as legislações ambientais podem assumir. Um

dos problemas que dificultam a condução de estudos referentes a esse tipo de desobediência legal é a ausência de uma seqüência temporal consistente de fotos aéreas que possam elucidar a dinâmica de ocupação e uso da zona costeira, bem como os mecanismos de percepção dos usuários (DRAGICEVIC; MARCEAU, 2000).



(a) Dunas – Especulação Imobiliária



(b) Restinga – Especulação Imobiliária



(c) Mangue - Pescadores



(d) Mata Atlântica - Mineração

Fotos a e b – Rafael M. Sperb; c e d – Marcus Polette

Figura 39. Exemplos de usos ilegais de áreas ao longo da costa de Santa Catarina, segundo grupos de usuários.

Difícilmente um Modelo Baseado em Agentes Difusos pode, por si só, preencher essa falta de pesquisa na área. Todavia, ele se mostra poderoso pela necessidade da construção do Caso (5.1.1), que exige do pesquisador o reconhecimento dos elementos do sistema, do comportamento de cada um deles e das conseqüências sobre o espaço.

5.3 CASO DA PRAIA DE INGLESES

Situada ao norte da Ilha de Santa Catarina, município de Florianópolis - SC, a Praia de Ingleses (Figura 40. Localização da Praia de Ingleses.

e 39) apresenta todas as características negativas do processo descrito no item 5.2. O que torna a Praia de Ingleses particularmente atrativa para demonstrar a viabilidade do emprego de Modelos Baseados em Agentes Difusos no estudo de processos de ocupação do espaço é a rapidez com que esse balneário experimentou o crescimento urbano (Figura 43), e a disponibilidade de uma considerável série histórica de fotos aéreas (1938, 1957, 1978, 1994, 1998 e 2000⁴⁶).

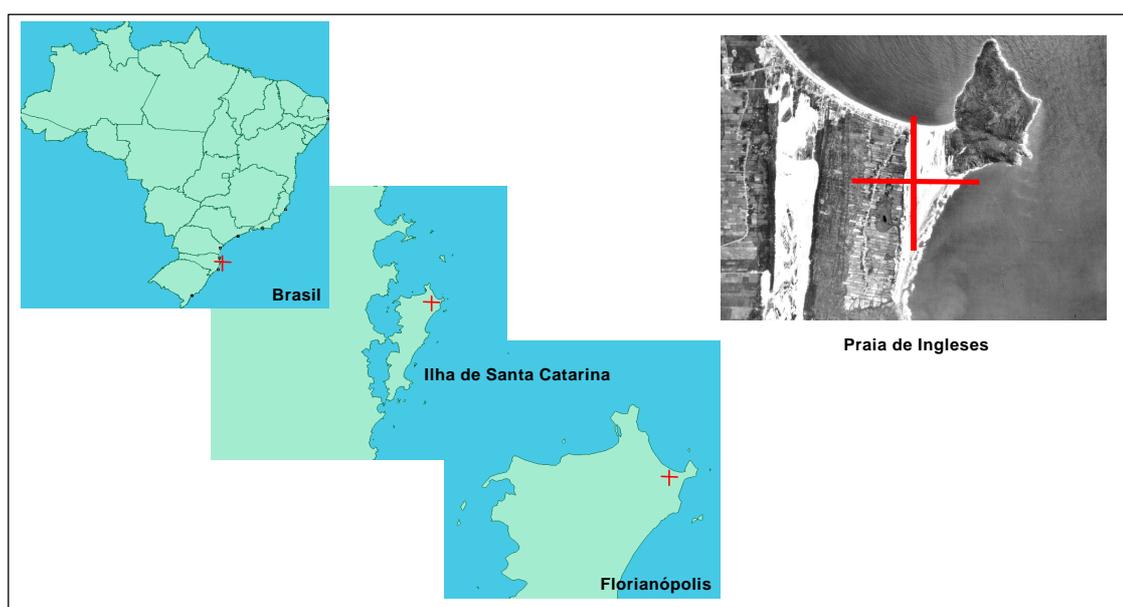


Figura 40. Localização da Praia de Ingleses.

O estudo de caso a seguir descreve as etapas anteriormente apresentadas (item 5.1.1).

5.3.1 Definição do Problema

A observação inicial da série de fotos indica que a expansão urbana ocorre, principalmente, pela abertura de novos caminhos e ruas. Embora seja uma observação bastante óbvia, esse fato aparenta ser um aspecto determinante na ocupação da área. Mesmo com nível de abstração bastante elevado (macro), esse comportamento se presta ao objetivo de testar o protótipo e a viabilidade do Modelo

⁴⁶ Fotos obtidas junto ao Governo do Estado de Santa Catarina, em escalas diversas.

Baseado em Agentes Difusos para estudos de processos espaciais. Assim, o problema a ser abordado consiste no desenvolvimento de uma simulação que represente o processo de ocupação da zona costeira de Ingleses, em função da existência de ruas.



Vista oeste



Vista leste

Figura 41. Vista aérea da Praia de Ingleses (Fotos: IPUF, 2000).

5.3.2 Desenvolvimento do Caso para a Praia de Ingleses

Definidos o problema e a área de estudo, faz-se necessário identificar os elementos do sistema costeiro em estudo, incluindo agentes e atributos espaciais, e os comportamentos, conforme descrito no item 4.2. Visando manter a simplicidade do Caso para fins de teste do protótipo, assume-se que existam dois tipos de grupos de usuários (agentes): aqueles que “preferem” morar na periferia da Praia de Ingleses e

os que “preferem” a região central, duas regiões facilmente identificáveis nas fotos aéreas. Obviamente, a ocupação da Praia de Ingleses não ocorre apenas pela existência dessas duas regiões, mas por uma combinação de motivações de magnitude bastante complexa. Essas motivações podem ter as mais diversas orientações, como proximidade da praia, disponibilidade de supermercados e lojas, facilidade de acesso aos meios de transporte, valor imobiliário, etc. Contudo, o que interessa ao Caso, no nível de abstração adotado, é que esses agentes preferem o atributo espacial periferia ou centro.

Além desses dois atributos, foi indicado na definição do problema que a existência de ruas é fundamental para a ocupação da Praia de Ingleses. Desse modo, as ruas constituem o terceiro atributo espacial a ser definido para o Caso (Figura 42). Centro, periferia e ruas representam a síntese dos atributos e percepções dos grupos de usuários para o Caso montado para a Praia de Ingleses.

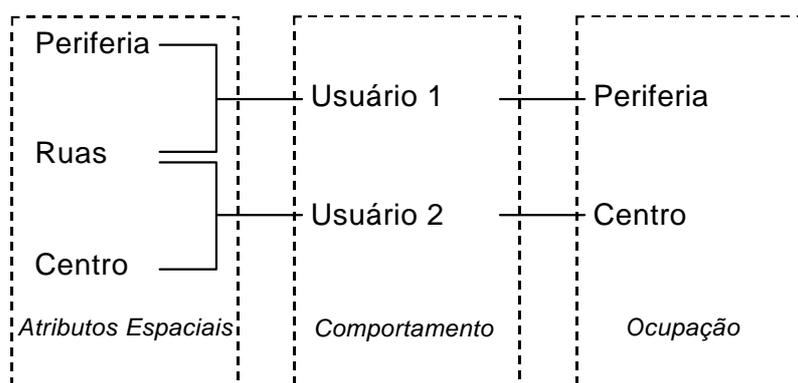


Figura 42. Representação esquemática do sistema costeiro da Praia de Ingleses com ênfase na ocupação do espaço. Nele os atributos espaciais geram uma resposta de comportamento (preferência) por parte dos usuários, que por sua vez irão buscar o local mais apropriado para se estabelecerem.

5.3.3 Análise Espacial e Estudo do Comportamento

Essa etapa é fundamentada na construção de uma base cartográfica e nas análises das fotos aéreas com o auxílio de Sistema de Informações Geográficas. Apesar de ser apresentada como terceira etapa, na realidade ela se iniciou antes das demais,

com a simples observação das fotos para definição da área de estudo⁴⁷ (Figura 44). Esse procedimento forneceu os primeiros indícios para a identificação do problema (item 5.3.1). Posteriormente, a análise mais detalhada possibilitou a confirmação dos indícios constatados na observação inicial, subsidiando a elaboração do Caso (item 5.3.2) e o estudo do comportamento espacial dos grupos de usuários.

a) Base cartográfica e fotointerpretação

Entre 1978 e 1998, a Praia de Ingleses apresentou um acelerado crescimento urbano, 1.365% para o período, conforme apresentado na Figura 43 (ROSIN; LAFIN; SPERB, 2002). Essa característica foi decisiva na escolha desse local para a elaboração do estudo de caso.

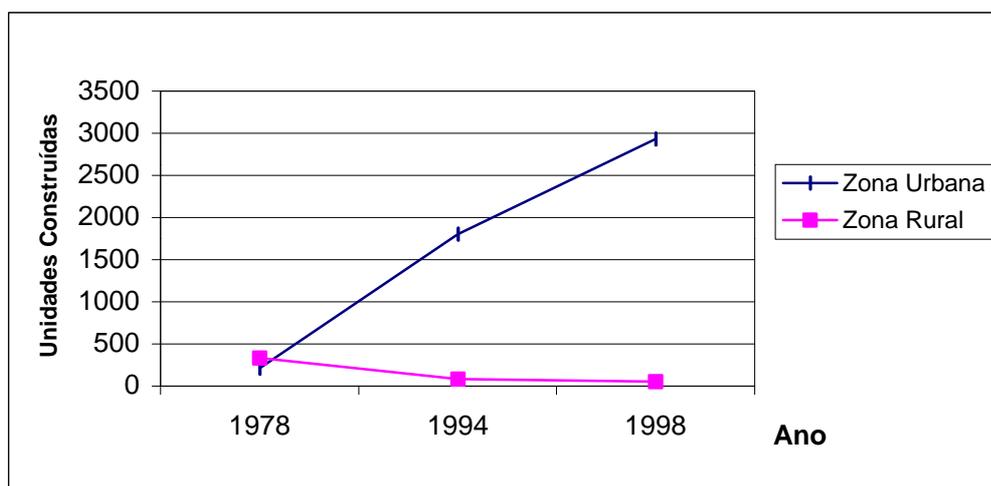
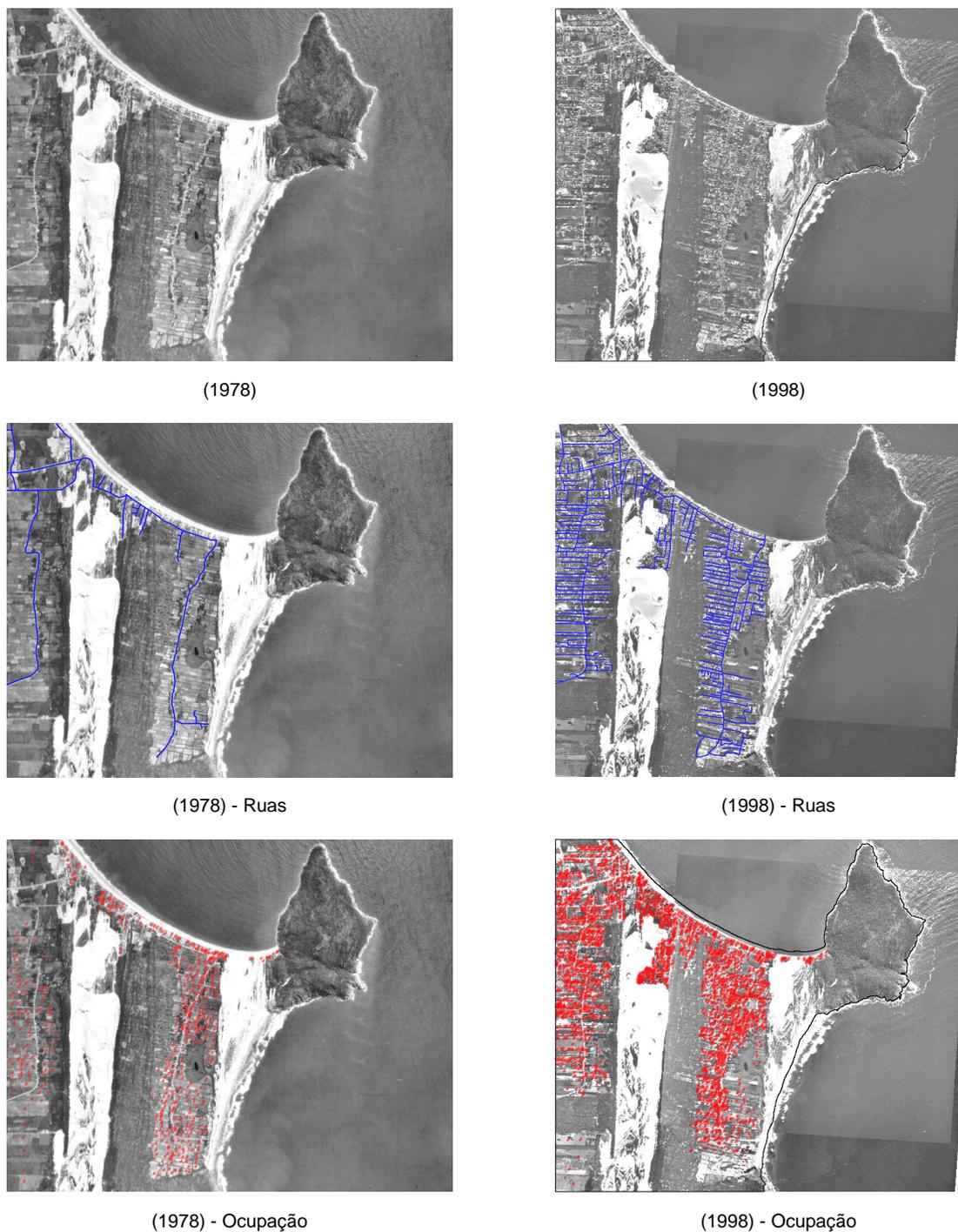


Figura 43. Crescimento urbano da Praia de Ingleses obtido a partir da fotointerpretação - contagem de unidades construídas.

As fotos aéreas utilizadas na fotointerpretação foram cedidas pela Secretaria Estadual de Desenvolvimento Econômico (SDE), em escalas que variam de 1:8.000 até 1:30.000. A Figura 44 apresenta as fotos mosaicadas e georreferenciadas para o período de tempo proposto. Na seqüência de fotos é possível visualizar o crescimento urbano e das ruas.

⁴⁷ Foram pré-selecionadas quatro áreas para o estudo de caso: Bombinhas, Pinheira, Mariscal e Ingleses. Ingleses foi a área que melhor preencheu os requisitos para o teste do protótipo.



Fotos: Secretaria Estadual de Desenvolvimento Econômico

Figura 44. Evolução das ruas e ocupação da Praia de Ingleses (1978-1998).

A fotointerpretação permitiu a identificação de ruas, caminhos, ocupação e áreas de proteção ambiental segundo o Código Florestal. Além dessas informações, foi gerada uma carta-base em escala 1:10.000 a partir de uma planta do Instituto de

Planejamento Urbano de Florianópolis (IPUF) contendo contornos e curvas de nível para a área (Figura 45).

b) Matrizes de percepção

Os atributos espaciais previamente definidos e delimitados na base cartográfica (Figura 46) serviram de base para a construção das *matrizes de percepção*. O resultado dessa operação foi exportado e normalizado por meio de um módulo de importação do simulador⁴⁸.

c) Regras de comportamento

Os dois itens relacionados à elaboração das regras de comportamento para o Caso, a percepção e as regras propriamente ditas, também foram gerados a partir da análise espacial. Uma vez que o Caso foi desenvolvido para teste do protótipo e em um nível de abstração bastante elevado, esta abordagem se mostrou suficiente.

i. Percepção Espacial

Idealmente, a identificação das variáveis lingüísticas associadas a um atributo espacial deve ser realizada com base na percepção de cada usuário. O mecanismo mais óbvio para se definirem essas variáveis consiste em obtê-las diretamente do usuário, por meio de entrevistas ou questionários. Essa questão juntamente com a definição das variáveis lingüísticas são abordadas no item 4.2.2⁴⁹. Entretanto, para efeito de teste do protótipo, as variáveis lingüísticas não foram definidas a partir da percepção dos usuários, mas sim da do modelador, a partir da análise espacial. Os valores associados às percepções se referem à distância em relação aos atributos (Figura 47 e Figura 48).

⁴⁸ O ArcView é o SIG adotado como padrão para este trabalho, por este motivo o módulo de exportação e importação das matrizes para o simulador trabalha somente com esse software.

⁴⁹ A exploração mais aprofundada deste tema foge ao escopo da tese, posto que o assunto é complexo o suficiente para dar origem a uma nova tese, principalmente se o tema estiver orientado à Modelagem Baseada em Agentes Difusos, área totalmente aberta à exploração.

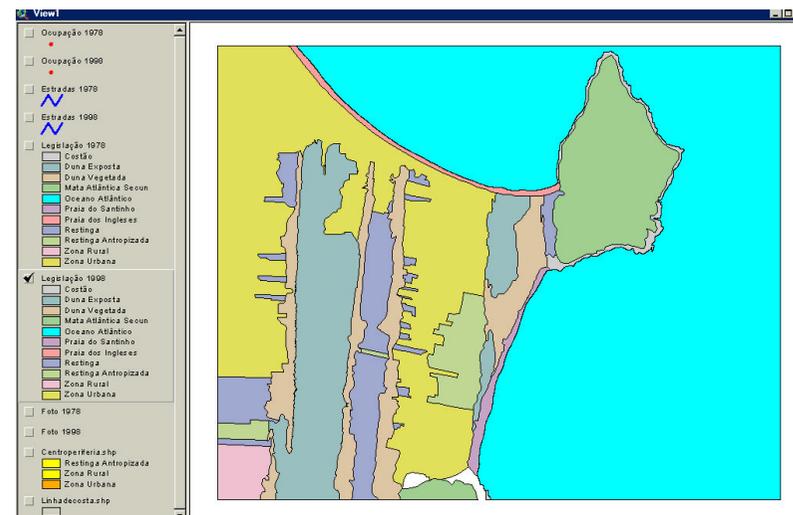
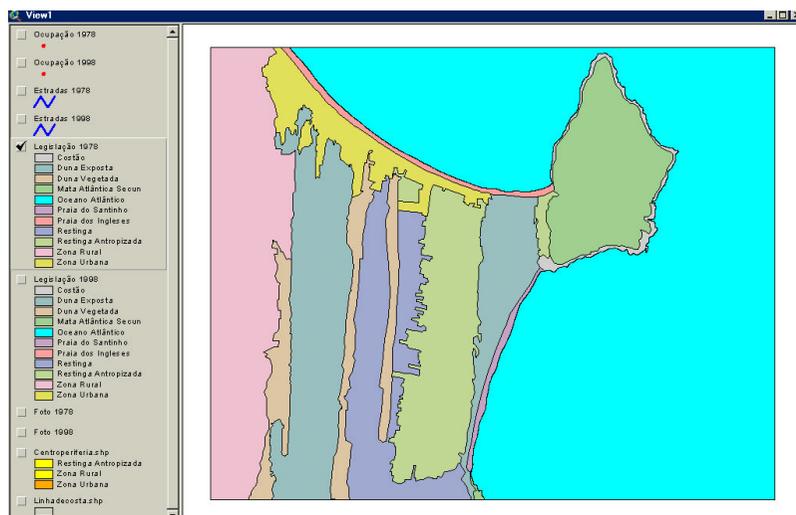
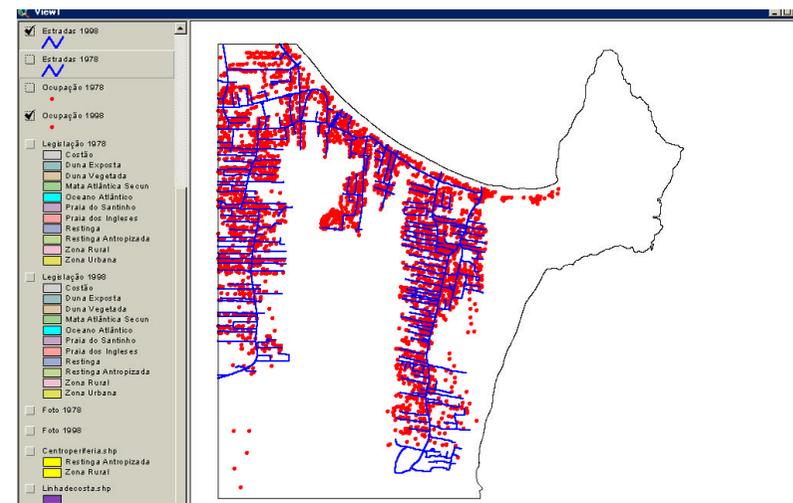
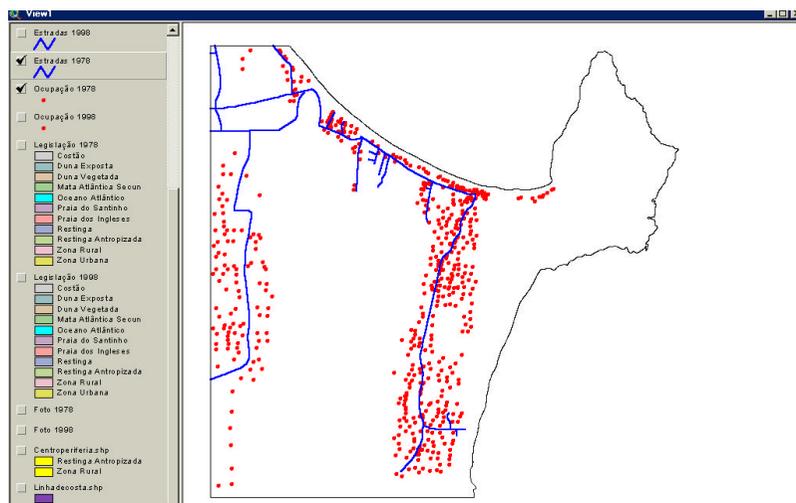


Figura 45. Base cartográfica e análise espacial para a Praia de Ingleses.

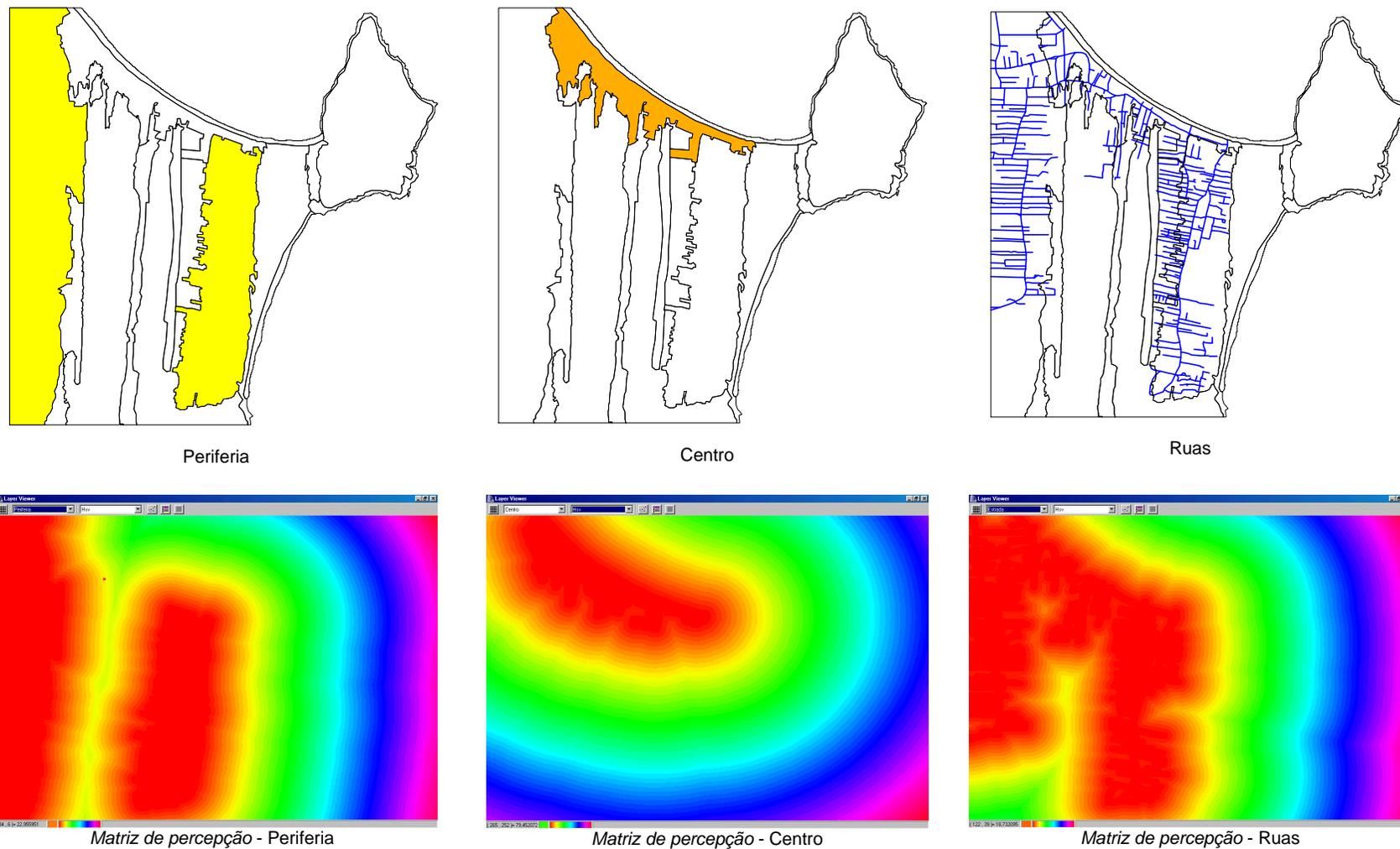


Figura 46. Mapeamento dos atributos espaciais e suas respectivas *matrizes de percepção* para o estudo de caso da Praia de Ingleses.

Variável Lingüística	Valor	Conjuntos Normalizados			Intervalo Real Periferia*	Intervalo Real Centro*	Intervalo Real Ruas*
Muito Próximo	mp	(0,0)	(0,1)	(25,0)	0 - 283	0 - 355	0 - 287
Próximo	pr	(0,0)	(25,1)	(50,0)	0 - 566	0 - 711	0 - 573
Relativamente Próximo	rp	(15,0)	(50,1)	(85,0)	170 - 962	213 - 1209	172 - 974
Pouco Próximo	pp	(35,0)	(85,1)	(150,0)	396 - 1698	498 - 2133	401 - 1719
Longe	lg	(65,0)	(150,1)	(256,0)	736 - 2898	924 - 3640	745 - 2934
Muito Longe	ml	(150,0)	(256,1)	(256,0)	1698 - 2898	2133 - 3640	1719 - 2934

*Valores arredondados em metros.

Figura 47. Variáveis lingüísticas para os atributos espaciais do estudo de caso.

Dado o fato de que nenhuma técnica foi utilizada para a identificação das variáveis lingüísticas, é de se supor que a definição dos conjuntos difusos também tenha ocorrido da mesma forma, isto é, a partir da percepção do modelador. Tal fato procede. Contudo os conjuntos sofreram ajustes a partir de exaustivos testes, sendo empregados os que renderam os melhores resultados.

Variável Lingüística	Conjuntos		
Terrível	(0,0)	(0,1)	(50,0)
Péssimo	(0,0)	(50,1)	(100,0)
Ruim	(50,0)	(100,1)	(150,0)
Regular	(100,0)	(150,1)	(200,0)
Bom	(150,0)	(200,1)	(250,0)
Excelente	(225,0)	(256,1)	(256,0)

Figura 48. Variáveis lingüísticas para as preferências dos usuários.

Para facilitar a visualização dos conjuntos difusos, adota-se a representação por sistema de coordenadas cartesianas. Considerando-se que o protótipo trabalha com conjuntos triangulares, estes podem ser definidos pelas coordenadas dos seus vértices (Figura 49). Em termos práticos, isso significa a substituição das equações das retas e os respectivos intervalos por gráficos obtidos a partir das três coordenadas. Na Figura 50 encontram-se representados graficamente os conjuntos difusos de percepção espacial e preferência.

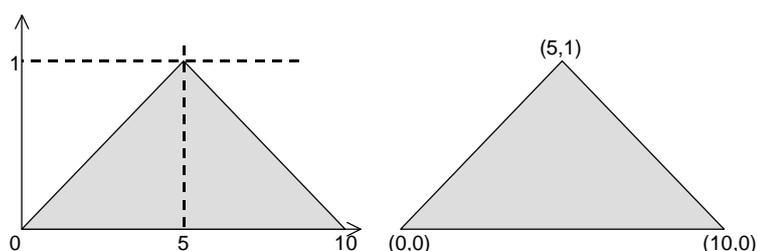


Figura 49. Representação dos conjuntos difusos através de coordenadas cartesianas.

ii. Regras de Comportamento

As regras de comportamento dos usuários da Praia de Ingleses utilizam os atributos e as variáveis lingüísticas anteriormente definidas. Mais uma vez o modelador foi responsável por sua definição. Via de regra, o comportamento se baseia na proximidade do agente em relação ao(s) atributo(s) por ele considerado(s). Por exemplo, para o agente periferia, a condição *muito próximo* da periferia satisfaz o grau máximo de preferência, ou seja, *excelente*. O mesmo ocorre em relação ao atributo ruas. Assim, é possível construir a regra de comportamento considerando os dois atributos e a preferência.

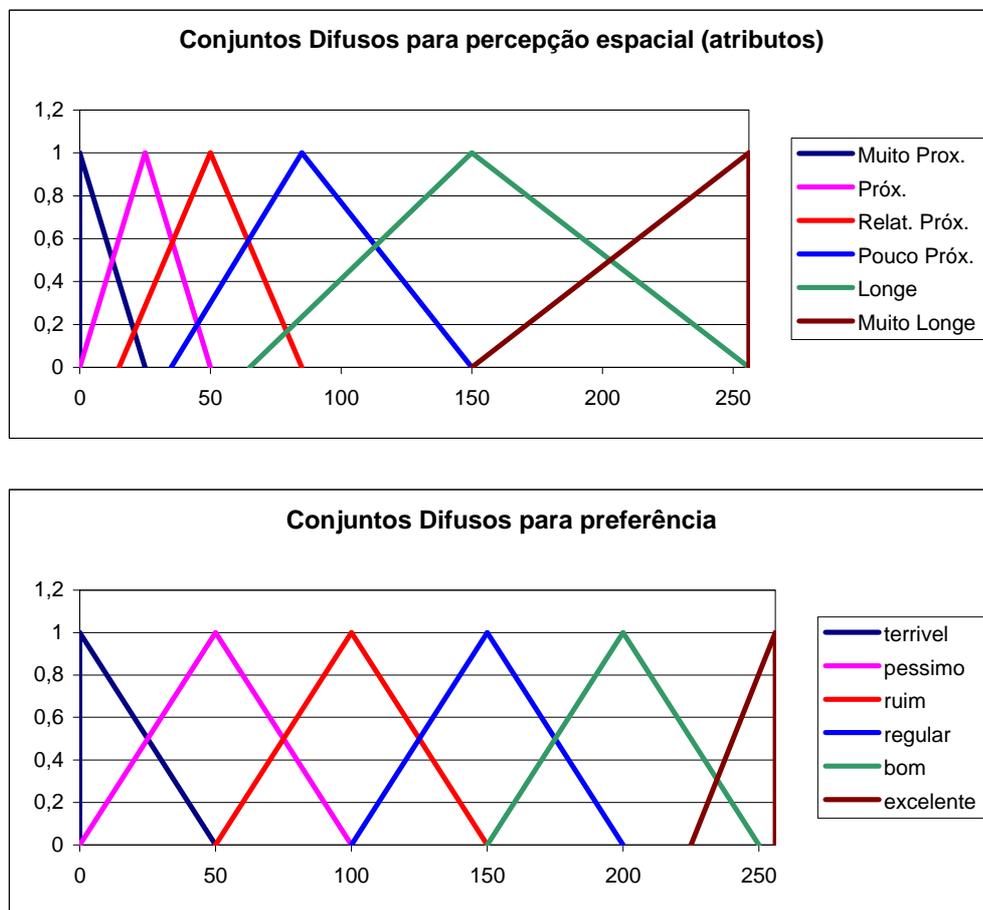


Figura 50. Representação gráfica dos conjuntos difusos de percepção e preferência dos usuários do estudo de caso.

A combinação dos valores de percepção e preferência pode ser mais bem compreendida através da matriz apresentada na Figura 51. Todavia, essa matriz somente tem efeito quando o comportamento do usuário é codificado considerando-

se apenas dois atributos de percepção espacial. As regras de comportamento tiveram origem nesta matriz (Figura 52).

Variável Lingüística	Ruas					
	Muito Próximo	Próximo	Relativamente Próximo	Pouco Próximo	Longe	Muito Longe
Periferia ou Centro						
Muito Próximo	excelente	bom	regular	ruim	péssimo	terrível
Próximo	bom	regular	ruim	péssimo	terrível	-
Relativamente Próximo	regular	ruim	péssimo	terrível	-	-
Pouco Próximo	ruim	péssimo	terrível	-	-	-
Longe	péssimo	terrível	-	-	-	-
Muito Longe	terrível	-	-	-	-	-

Figura 51. Matriz cruzamento de atributos visando à determinação de preferências.

Premissa				Conclusão		
if	((Centro IS mp)	AND	(Ruas IS mp))	OUTPUT	=	excelente
if	((Centro IS mp)	AND	(Ruas IS pr))	OUTPUT	=	bom
if	((Centro IS mp)	AND	(Ruas IS rp))	OUTPUT	=	regular
if	((Centro IS mp)	AND	(Ruas IS pp))	OUTPUT	=	ruim
if	((Centro IS mp)	AND	(Ruas IS lg))	OUTPUT	=	péssimo
if	((Centro IS mp)	AND	(Ruas IS ml))	OUTPUT	=	terrível
if	((Centro IS pr)	AND	(Ruas IS mp))	OUTPUT	=	bom
if	((Centro IS pr)	AND	(Ruas IS pr))	OUTPUT	=	regular
if	((Centro IS pr)	AND	(Ruas IS rp))	OUTPUT	=	ruim
if	((Centro IS pr)	AND	(Ruas IS pp))	OUTPUT	=	péssimo
if	((Centro IS pr)	AND	(Ruas IS lg))	OUTPUT	=	terrível
if	((Centro IS rp)	AND	(Ruas IS mp))	OUTPUT	=	regular
if	((Centro IS rp)	AND	(Ruas IS pr))	OUTPUT	=	ruim
if	((Centro IS rp)	AND	(Ruas IS rp))	OUTPUT	=	péssimo
if	((Centro IS rp)	AND	(Ruas ISpp))	OUTPUT	=	terrível
if	((Centro IS pp)	OR	(Ruas IS pp))	OUTPUT	=	ruim
if	((Centro IS pp)	OR	(Ruas IS lg))	OUTPUT	=	péssimo
if	((Centro IS pp)	OR	(Ruas IS ml))	OUTPUT	=	terrível
if	((Centro IS lg)	OR	(Ruas IS lg))	OUTPUT	=	péssimo
if	((Centro IS ml)	OR	(Ruas IS ml))	OUTPUT	=	terrível

Figura 52. Regras de comportamento para o agente centro segundo a sintaxe adotada pelo script de configuração.

iii. Mapa mental

A codificação dos comportamentos para o mecanismo de inferência difusa viabiliza a geração dos mapas mentais centro e periferia, conforme apresentado no item 4.3.2 (Figura 53). Nesses mapas, a região correspondente à preferência excelente encontra-se definida pelas cores vermelho-escuro e rosa-choque; o valor terrível corresponde à cor laranja; os demais valores encontram-se distribuídos no intervalo entre esses dois valores extremos.

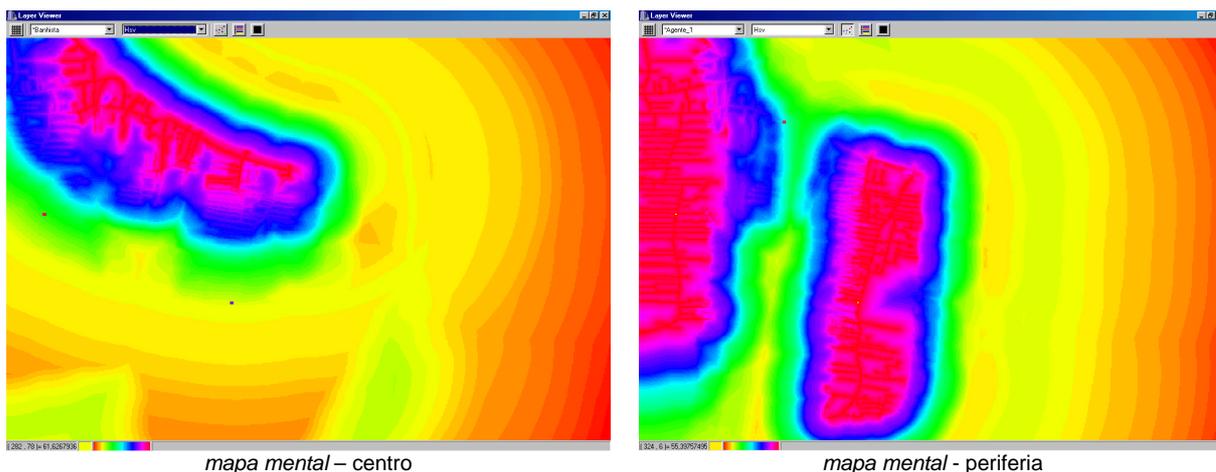


Figura 53. Mapas mentais para modelo conceitual da Praia de Ingleses.

5.3.4 Simulação

O teste do protótipo contou com a construção de duas simulações. A primeira (Simulação I) considerou apenas o agente *centro*, ou seja, o usuário que possui preferência pela região central da Praia de Ingleses. Esse primeiro teste visou não apenas à exploração das variáveis lingüísticas, dos conjuntos difusos e das regras de comportamento, mas também ao desempenho do protótipo propriamente dito. Em face do resultado significativo, a primeira simulação foi expandida, passando a considerar o usuário com preferência pela periferia (Simulação II). Esse segundo tipo de agente fez uso do mesmo comportamento do agente *centro*, ocorrendo apenas a substituição do atributo espacial, isto é, da *matriz de percepção* do atributo centro pela periferia.

a) Script de Configuração

O *script* de configuração é um arquivo do tipo ASCII empregado para passar ao simulador os elementos que compõem o Caso. Uma lista com os elementos descritos nesse arquivo e sua descrição são apresentadas no Figura 54.

O *script* e a sintaxe empregados no arquivo de configuração consideram a facilidade de inclusão e exclusão de novos agentes e atributos espaciais na simulação (Figura 55). O compartilhamento de *matrizes de percepção* é uma das características importantes do *script*, pois permite a reutilização de matrizes já existentes. A apreciação de um arquivo de configuração pode ser feita no Anexo B.

Elemento	Descrição
PROJECT	nome do projeto
GRID	dimensões da matriz (universo virtual)
LAYER	nome da <i>matriz de percepção</i>
DEFAULT	valores da matriz (para criação de matrizes de valor único)*
RANGE	reta-suporte para os conjuntos difusos
DATA	arquivo contendo <i>matriz de percepção</i>
AGENT	nome do agente
POSITION	posição inicial do(s) agente(s)
ALPHA	valor atribuído ao <i>alpha cut</i>
IMPACT	definição do valor e a matriz que o agente impacta
COUNT	número de agentes
INPUT	nome do conjuntos difusos de percepção
USELAYER	<i>matriz de percepção</i> utilizada
MEMBER	definição das variáveis lingüísticas e conjuntos difusos de entrada
OUTPUT	nome do conjunto difuso de saída
MEMBER	definição das variáveis lingüísticas e conjuntos difusos de saída
RULES	codificação das regras de comportamento

* *Matriz empregada para estudo de impacto e comunicação entre agentes.*

Figura 54. Lista de elementos necessários à configuração de um *script*.

```
PROJECT <project_name>
{
  GRID: ( <width>, <height> )
  LAYER <layer_name>
  {
    DEFAULT: <value>
    RANGE: ( <min_value>, <max_value> )
    DATA: " <map_file_name> "
  }
}
AGENT <agent_name>
{
  POSITION: [ auto | ( <x>, <y> ) | ( <x>, <y>; <x>, <y> ) | " <position_file_name> " ]
  ALPHA: <value>
  IMPACT: ( <layer_name>, <value> ) [, ( <layer_name>, <value> ), ...]
  COUNT: <value>
  INPUT <set_name>
  {
    USELAYER: <layer_name>
    MEMBER: <member_name> ( <x_value>, <y_value> ) ( <x_value>, <y_value> ) [...]
    [...]
  }
  OUTPUT <set_name>
  {
    MEMBER: <member_name> ( <x_value>, <y_value> ) ( <x_value>, <y_value> ) [...]
    [...]
  }
  RULES
  {
    IF ( <expression> ) OUTPUT = <output_member_name>
    [...]
  }
}
}
```

Onde:

<expression>:
 [(<layer_name> IS <input_member_name>) | (<expression> AND <expression>) | (<expression> OR <expression>)]

#: comentário

Figura 55. Sintaxe do *script* de configuração.

b) Desenvolvimento e Resultados

Os elementos básicos de cada uma das simulações encontram-se listados no Figura 56. A Simulação I foi rodada 174 vezes para o ajuste das variáveis lingüísticas e das regras de comportamento do usuário *centro* (“ajuste fino”).

Simulação:	I	II
Atributos Espaciais:	Centro e Ruas	Centro, Periferia e Ruas
Tipos de Agentes:	Centro	Centro e Periferia
Nº de Agentes:	1.591	1.591 (Centro); 1.399 (Periferia)
Nº de interações:	10.000	10.000

Figura 56. Sumário dos elementos das simulações.

No item 4.3.4, subitem “b”, foi indicada a inexistência de passos de tempo associado ao tempo real para o simulador, sendo o final da simulação alcançado na estabilização dos agentes. Como os agentes tendem a se estabelecer na região em que têm suas agendas satisfeitas, as simulações foram encerradas no momento em que se constatou a estabilidade do sistema. O resultado da Simulação I e o Teste de similaridade espacial aplicado a este resultado podem ser observados na Figura 57.

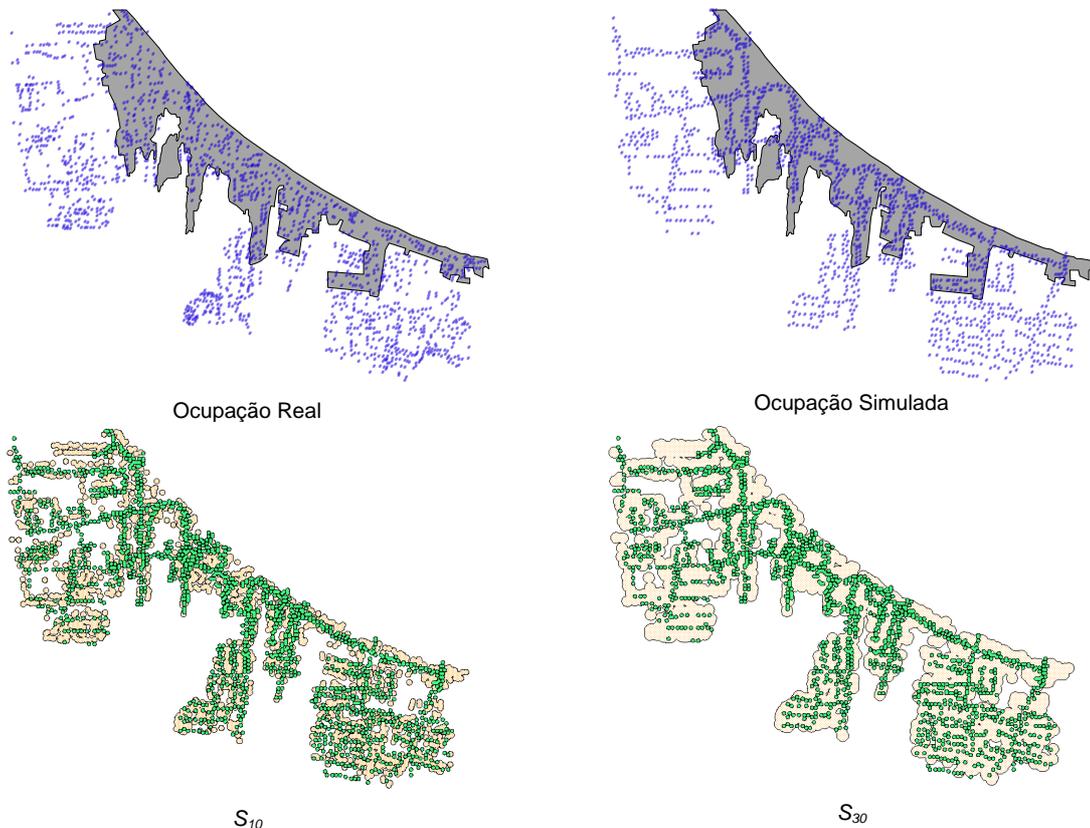


Figura 57. Resultado e teste de similaridade para Simulação I.

Tendo sido alcançada uma configuração para a Simulação I que produziu resultados similares à realidade, procedeu-se à inclusão do segundo usuário (*periferia*) ao *script*. Para essa segunda simulação (Simulação II), o modelo foi rodado apenas uma vez, não sendo necessário o “ajuste fino” para a obtenção de resultados significativos. O desenvolvimento dessa simulação pode ser acompanhado por meio dos *snapshots* apresentados pela Figura 58. A Tabela 1 apresenta a comparação entre os *Índices de Similaridade* encontrados nas duas simulações. É importante notar que, em linhas gerais, as similaridades entre as duas simulações encontram-se bastante próximas. O resultado e o teste de similaridade para a Simulação II podem ser observados na Figura 59.

Tabela 1. Índices de similaridade encontrados para as Simulações I e II.

Simulação:	I	II
S ₁₀	25,81%	22,06%
S ₁₅	48,18%	42,98%
S ₃₀	90,32%	82,87%
S ₄₅	98,74%	92,28%

Os testes desenvolvidos para as duas simulações apresentaram resultados bastante próximos entre si, havendo uma pequena redução da similaridade para a Simulação II. Esse fato pode ser atribuído ao aumento da complexidade do sistema e à existência de um grupo de usuários que apresentam percepções e regras de comportamento diferentes dos dois grupos de usuários simulados. Esse grupo consiste em pescadores e seus ranchos de pesca, os quais se encontram em áreas sem ruas, em área que não pode ser considerada como centro ou periferia, e que é protegida pela ação de ondas.

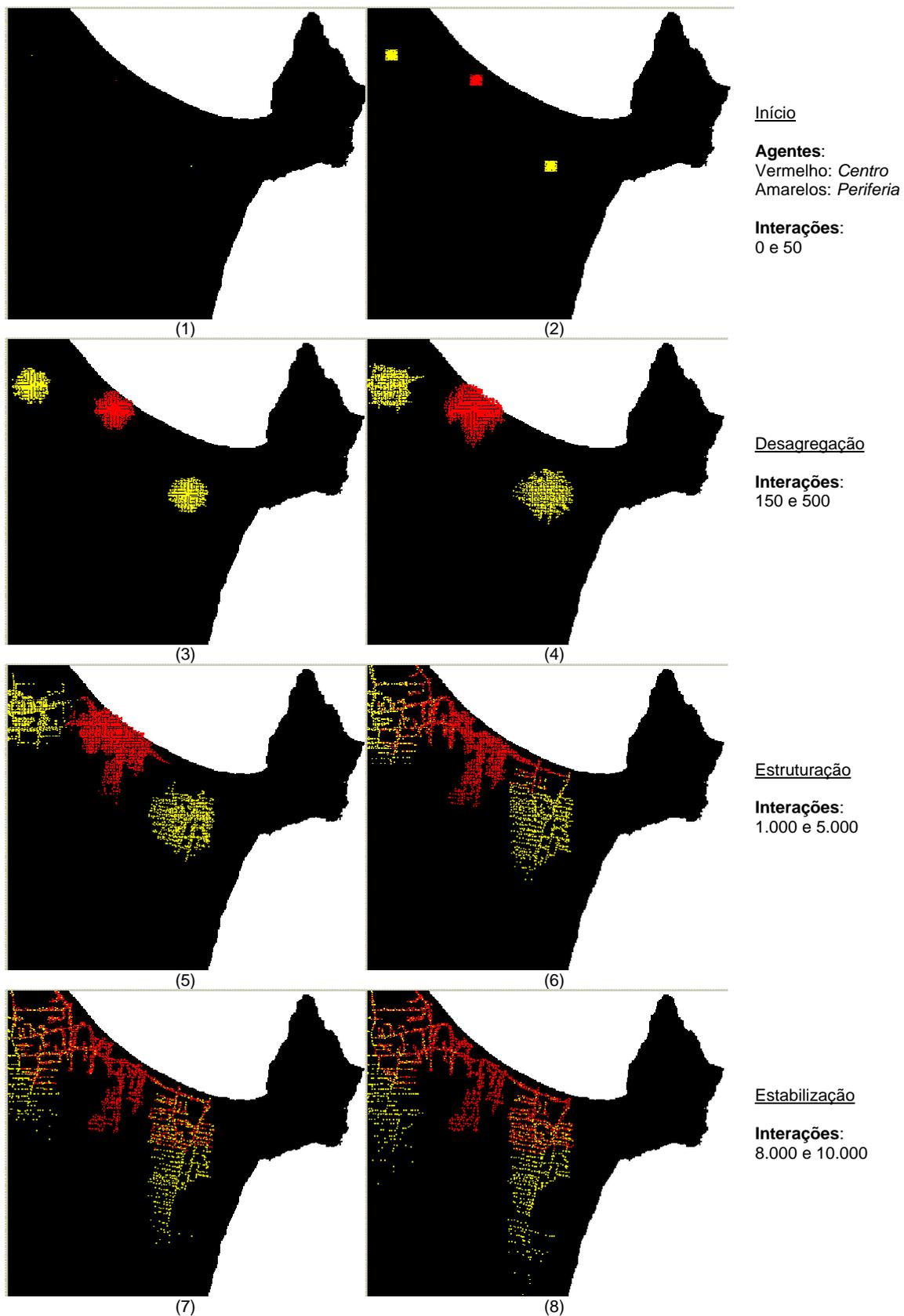


Figura 58. Snapshots da evolução da Simulação II.

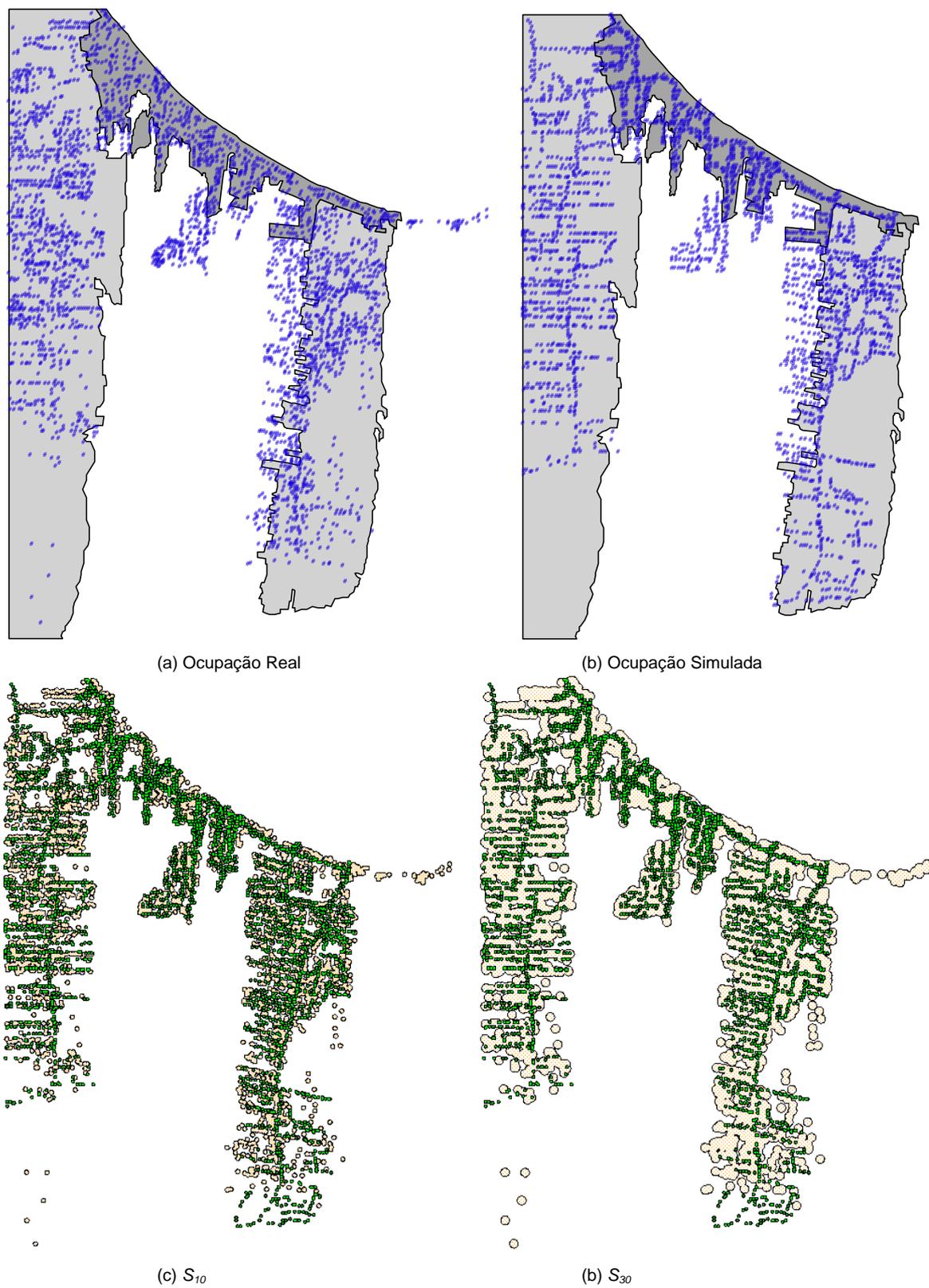


Figura 59. Resultado e teste de similaridade para a Simulação II.

CAPÍTULO

6 DISCUSSÃO

“If something has an explanation, you can explain it. If it has no explanation, you should explain why you can not explain it...”

Carlos Gershenson García, 2001

6.1 ESTUDO DE CASO

Relembra-se que o objetivo geral desta tese (item 1.4.1) consiste no desenvolvimento de um modelo de simulação baseado em Agentes Inteligentes e Lógica Difusa orientado ao estudo do comportamento de usuários em zonas costeiras, de modo a avaliar suas percepções espaciais e conseqüente distribuição no meio ambiente. Desse modo, os subitens que compõem este capítulo visam discutir se o modelo proposto cumpriu esse objetivo. A discussão não pode ocorrer sem a apreciação dos resultados obtidos no estudo de caso, com a devida consideração de que as limitações operacionais do protótipo não comprometem o potencial demonstrado pelo modelo conceitual.

6.1.1 Características e Limitações do Protótipo

a) Resultados

A construção do estudo de caso visou, primariamente, ao teste do modelo conceitual através do desenvolvimento de uma simulação em um protótipo implementado para esse fim. Por conseqüência, o Caso da Praia de Ingleses foi tratado no campo instrumental, sem compromisso com qualquer tipo de aprofundamento não necessário ao teste. Essa consideração justifica a simplicidade do Caso, que, apesar disso, comprovou, por meio dos testes de similaridade espacial, a viabilidade do emprego de Lógica Difusa e Agentes Inteligentes para estudos de processos espaciais (Tabela 1).

A codificação da percepção e do comportamento dos agentes permitiu a reprodução da ocupação da Praia de Ingleses, num ambiente virtual, com distribuição muito próxima à real. Encontrar índices S_{45} na casa dos 99% e 92% para as Simulações I e II, respectivamente, significa o mesmo que dizer que os dados simulados apresentaram desvio máximo de 45 metros da posição dos dados de ocupação real, conforme ilustrado pela Figura 60. Considerando-se que a motivação para a utilização desse tipo de simulação não é precisão, mas sim a compreensão da percepção e do comportamento espacial de grupos de usuários em zonas costeiras, é suficiente ao modelador a indicação da tendência de ocupação, idéia previamente apresentada. Contudo, essa magnitude de desvio não deve ser considerada como erro, mas sim como uma limitação do protótipo, ou mesmo do próprio Modelo Conceitual.

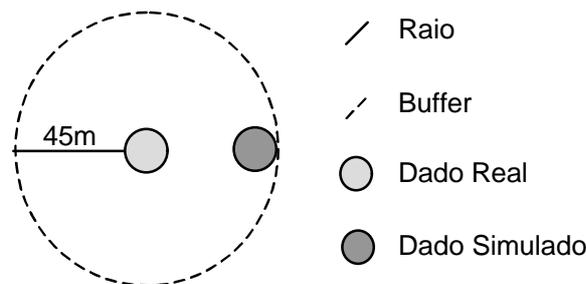


Figura 60. Interpretação prática do índice de similaridade S_{45} .

b) Agente Difuso

Um aspecto que deve ser abordado a esta altura do trabalho é a avaliação do agente implementado no protótipo diante da definição de agentes aqui adotada (item 2.1.2). Segundo a definição, um agente deve estar situado num ambiente, como parte integrante deste, de modo a poder atuar e senti-lo ao longo do tempo, e estar em busca de sua agenda, de modo a afetar o que ele sentirá no futuro (feedback).

Não parece difícil reconhecer os itens sublinhados no agente do protótipo. Ao ambiente correspondem as *matrizes de percepção* e o *mapa mental* onde cada agente vive e atua, de acordo com sua percepção e comportamento (*inferência difusa*), em busca de sua agenda (*área de preferência*) ao longo do tempo, e em interação com os demais agentes (*impacto*). Entre esses itens, apenas o tempo deve

ser apreciado com maior cuidado, uma vez que a inclinação natural de qualquer pessoa é associar o passo de tempo de uma simulação com o tempo real⁵⁰. No protótipo implementado, a associação direta entre passo da simulação e uma unidade de tempo não existe. Caso haja necessidade de associação ao tempo real, o modelador deverá recorrer a mecanismos indiretos, como, por exemplo, dados de projeção (taxa de crescimento populacional). Assim, a simulação pode ser desenvolvida para um número de agentes obtidos a partir da projeção para um período futuro. Nesse caso, o número de agentes na simulação irá corresponder ao número projetado, sendo atribuída à estabilização do sistema o período p rojetado.

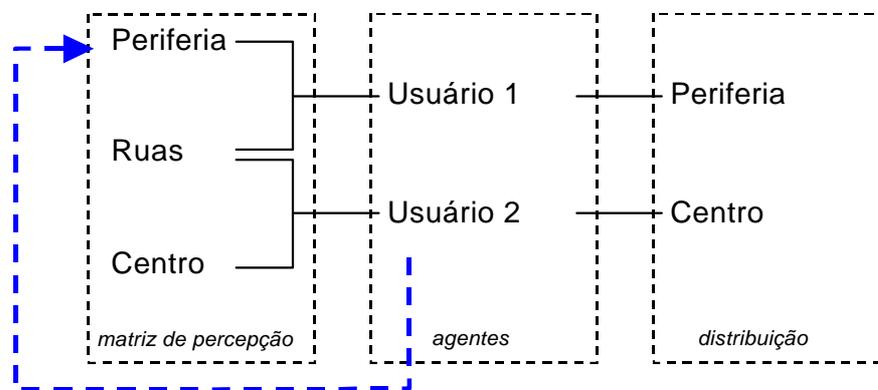


Figura 61. Representação esquemática do mecanismo de comunicação entre os agentes através do impacto (seta azul) causado à matriz de percepção periferia pelo usuário 2.

A análise anterior também se aplica aos atributos dos agentes (item 2.1.3). Esses atributos partem do princípio de que o agente está inserido em um ambiente virtual onde percepção, autonomia, mobilidade, sociabilidade e adaptabilidade são itens considerados essenciais para um agente ser considerado como tal. Os três primeiros são facilmente identificáveis no protótipo e não requerem nenhum comentário. Já a sociabilidade e a adaptabilidade devem ser apreciadas com precaução. A sociabilidade requer um pequeno esforço para reconhecê-la. A comunicação entre os agentes é feita de maneira indireta, através do impacto causado por um agente à matriz de percepção de outro agente. Esse tipo de comunicação pode ser observado na representação esquemática da Figura 61. Nessa figura, o usuário 2 impacta a

⁵⁰ O tempo real refere-se ao tempo medido em unidades: segundos, minutos, horas, dias, meses, etc.

matriz de percepção periferia no endereço que ocupa, bem como em sua vizinhança. Assim, o usuário 1 recebe, indiretamente, a informação de que o usuário 2 ocupa uma determinada célula. Em resumo, o usuário 2 altera o valor da matriz de percepção periferia, a qual o usuário 1 utiliza para a construção de seu *mapa mental* e para a busca de sua agenda.

A concepção do impacto no protótipo partiu do princípio de que qualquer agente pode impactar uma ou mais matrizes de percepção, que a ele pertença(m) ou não. Assim, de acordo com o comportamento codificado, um impacto pode ser positivo ou negativo. Um exemplo prático desse tipo de comunicação consiste na codificação do mecanismo de segregação, conforme ilustrado na Figura 62. No exemplo, o comportamento dos dois agentes é idêntico e visa à busca pelo local de preferência representado em branco na Figura 62a. Para o agente azul-claro, é definido um impacto sobre a matriz de percepção do agente azul-escuro, de modo a não permitir sua presença próxima ao primeiro. Ainda assim, sua agenda o orienta para a busca da região em branco, fazendo-o orbitar na periferia do agente azul-claro, caracterizando o efeito de segregação.

Em relação à adaptabilidade do agente, ela ocorre na busca por sua agenda. Conforme apresentado anteriormente, a simulação tende à estabilização à medida que os agentes cumprem sua agenda. Se por algum motivo a estabilidade do sistema é quebrada, o agente irá procurar um novo local que cumpra com sua necessidade (agenda). Contudo, é possível argumentar que este seja um comportamento de percepção e autonomia, em vez de adaptação. Em parte, esse argumento está correto, pois não existe nenhum mecanismo de evolução do comportamento do agente no protótipo. Esforços no sentido de aplicar princípios evolucionistas em agentes vêm sendo conduzidos na área de robótica, através do emprego de algoritmos neurodifusos e genéticos. Sob esse prisma, o protótipo não contempla esse atributo.

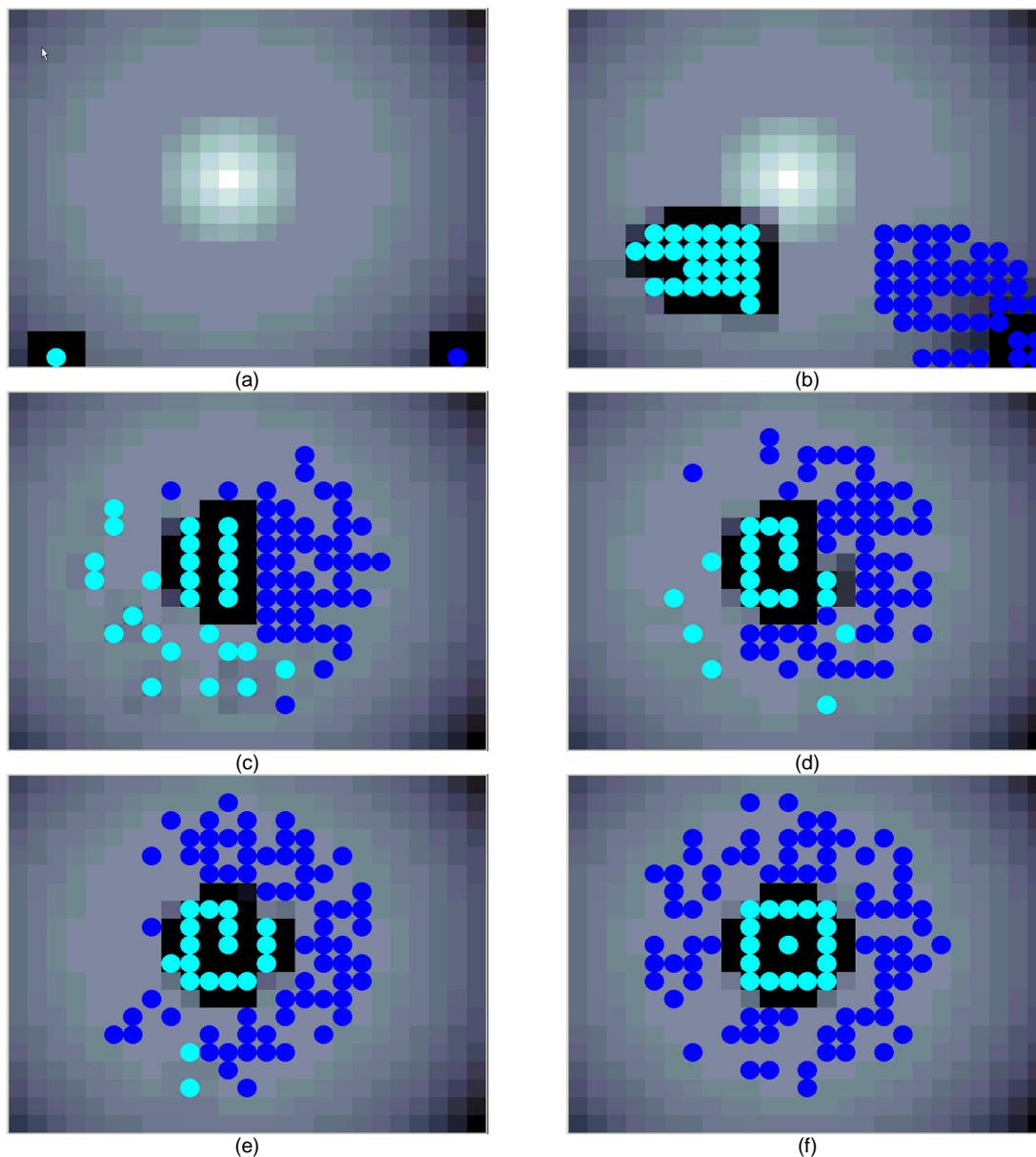


Figura 62. Segregação entre agentes a partir da utilização do impacto.

Apesar da ausência de um mecanismo de evolução do comportamento, pode-se dizer que as entidades desenvolvidas no protótipo são agentes. Por terem como mecanismo de codificação e inferência do comportamento um sistema difuso, é apropriado chamá-las de *agentes difusos*.

c) Modelo Baseado em Agentes Difusos

Não há dúvida de que o protótipo viabiliza a implementação de *agentes difusos*. Resta verificar se ele contempla as propriedades dos MBA apresentados no item

2.2.2: *caráter exploratório, abstração do comportamento de agentes e propriedades emergentes.*

O *caráter exploratório* pôde ser evidenciado em dois momentos na construção do Caso para a Praia de Ingleses. No primeiro momento, o “ajuste fino” desenvolvido para a Simulação I pode ser encarado como uma exploração à definição das variáveis lingüísticas e do comportamento. Já no segundo momento, essa propriedade é evidenciada pela incorporação do segundo agente (*periferia*) na Simulação II. É impossível deixar de notar, no entanto, que no primeiro momento essa propriedade está diretamente associada à abstração do comportamento de agentes, ou seja, explorar a percepção e comportamento dos agentes na Simulação I também é uma forma de abstrair os comportamentos. Nesse caso, as noções de abstração e de exploração encontram-se bastante mescladas, a ponto de não se permitir a sua separação. Por outro lado, a inclusão de um novo agente na Simulação II consiste num genuíno procedimento de exploração em um MBA. Na prática, a diferença entre *caráter exploratório* e *abstração de comportamento* é difícil de ser notada, e o que pode ser adotado para diferenciá-los é a inclusão, ou não, de novos elementos ao Caso, sejam eles atributos ou agentes. Por esse procedimento, a abstração estaria restrita ao agente já incluído no Caso, enquanto a exploração, à inclusão desses elementos.

A *abstração do comportamento* deve ser abordada na escala de observação adotada. Assim, para o Caso da Praia de Ingleses, o nível adotado determinou a existência de dois agentes: *centro* e *periferia*. Por conseqüência, o comportamento dos agentes é desenvolvido em face dos atributos considerados importantes para esses agentes. Se a escala adotada fosse mais detalhada, considerando atributos que compõem a atração ao centro, como supermercados, lojas, ruas, bancos, etc., outros tipos de agentes poderiam ser incluídos, com comportamentos orientados à esses atributos.

A existência de *propriedades emergentes* para o Caso da Praia de Ingleses é evidenciada pela existência de máximos e mínimos locais no *mapa mental* (Figura 63a). Como a visão do agente é restrita à vizinhança de Moore (item 4.3.4, subitem “b”), sua existência gera a estabilização do agente em áreas que não são aquelas

consideradas ótimas para sua agenda. Esse tipo de comportamento é referenciado por Axtell e Epstein (1999) como *racionalidade limitada*, descrita como a racionalidade baseada em informações limitadas (SCHUT; WOOLDRIDGE, 2001), um processo comum em estudos relacionados à teoria da decisão. Seus efeitos sobre a simulação podem ser observados na Figura 63b, onde a distribuição dos agentes apresenta erros relacionados à existência dessas áreas.

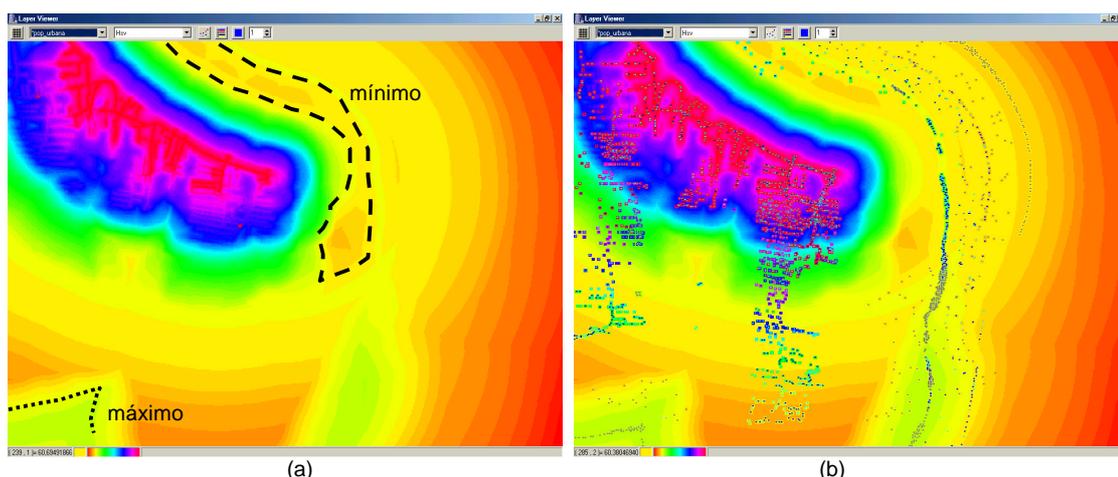


Figura 63. Exemplo de propriedade emergente causada pela (a) presença de máximos e mínimos locais e (b) a sua consequência em termos de distribuição: racionalidade limitada.

Um exemplo clássico de racionalidade limitada é a escolha de local para estacionar. Muitas vezes um motorista opta por estacionar longe do local ideal, por considerar a possibilidade de inexistência de vaga, mesmo que essa vaga exista. A presença dessa propriedade não foi explorada no estudo de caso, sendo considerada, num primeiro momento, indesejável por gerar resultados estranhos à realidade.

A racionalidade limitada evidenciada no estudo de caso ocorreu devido à distribuição aleatória inicial para a simulação. A solução para esse problema se deu pela consideração do *efeito rua*. Assumiu-se que o acesso dos usuários à Praia de Ingleses ocorre pelas ruas. Assim, a simulação foi semeada em três diferentes pontos, conforme ilustrado na Figura 58. A ideia se baseou na utilização das ruas como vias de circulação dos agentes, eliminando-se a influência dos máximos e mínimos locais. Uma outra solução seria o aumento do campo de visão do agente, uma solução não experimentada para o protótipo.

Uma segunda propriedade emergente ocorreu após a estabilização da simulação, com o aparecimento de uma área com características de centro e periferia, ou seja, uma zona de transição ocupada por usuários de ambos os grupos. A mistura desses dois grupos não foi prevista no comportamento dos agentes (Figura 64). O exemplo de segregação apresentado na Figura 62 também demonstra a geração de propriedades emergentes, confirmando a viabilidade do protótipo em gerar um Modelo Baseado em Agentes Difusos.

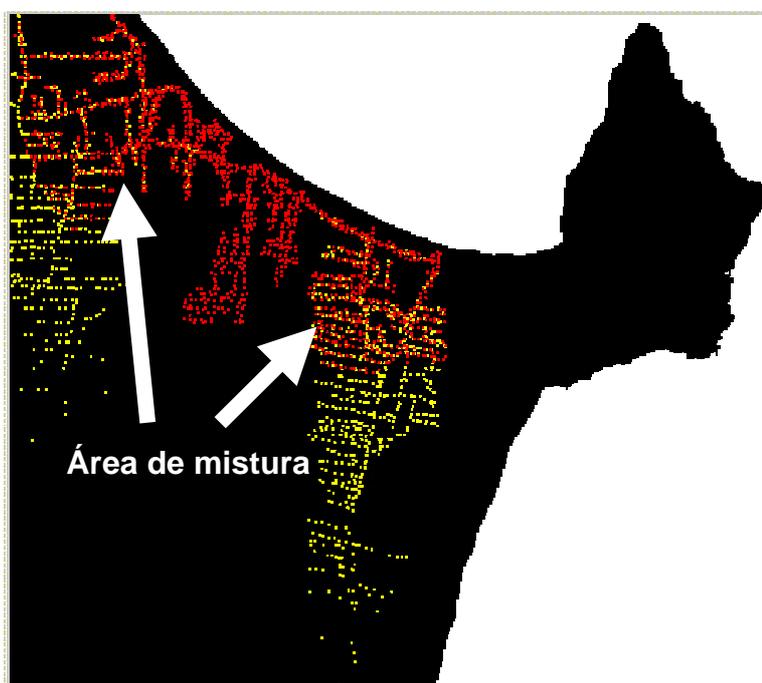


Figura 64. Exemplo de propriedade emergente: mistura entre os tipos de agentes nas áreas entre o centro e periferia.

d) Limitações do Protótipo

O estudo de caso proporcionou a identificação de algumas limitações do protótipo que merecem ser mencionadas. Entre elas figuram alguns dos desenvolvimentos sugeridos para futuras versões do protótipo.

i. Impacto

Duas importantes limitações encontradas no protótipo encontram-se associadas ao impacto. A primeira consiste na ausência de um efeito memória junto à matriz de percepção. Na presente versão, o impacto ocorre na célula ocupada pelo agente e em sua vizinhança, sumindo tão logo a célula seja liberada. Em algumas situações é desejável a existência de um efeito memória que, gradualmente, reduza o efeito do impacto após a liberação da célula impactada. Esse tipo de mecanismo visa propiciar a representação de impactos como a retirada da cobertura vegetal, ou visa que fontes poluidoras sejam consideradas em simulações.

A segunda limitação se refere à presença do impacto apenas nas células adjacentes (vizinhança de Moore). O emprego do conceito de zona de impacto, com gradual redução do impacto a partir de uma região focal, poderá trazer resultados mais realistas ao MBA difuso.

ii. Visão Reduzida

Assim como o impacto, a visão do agente encontra-se restrita à vizinhança da célula que ele ocupa (vizinhança de Moore). Em princípio, o problema de racionalidade limitada encontraria solução num maior campo de visão. Por outro lado, a possibilidade de se definir o campo de visão de um agente pode ser uma alternativa para simulações que considerem diferentes níveis de informações para os agentes.

iii. Comunicação Direta entre Agentes

O protótipo atualmente não permite a modelagem do comportamento que não seja espacial, ocorrendo a comunicação entre os agentes de forma indireta. A implementação de simulações se beneficiaria caso houvesse um mecanismo de decisão baseado não apenas na informação espacial, mas também na incorporação de regras de relacionamento entre os agentes. Essa consideração induz a uma alteração profunda no protótipo e deve ser conduzida com cuidado, pois exige a existência de um mecanismo de decisão que considere tanto informações espaciais quanto informações não-espaciais, como, por exemplo, flutuação da taxa de câmbio.

iv. Evolução do Comportamento

Foi citado anteriormente que o comportamento não apresenta nenhuma possibilidade de evolução. Em outras palavras, o agente não tem capacidade de aprendizado. Esse é um assunto complexo, que deve ser pensado à luz da aplicação que se busca desenvolver. Em termos de ocupação do espaço, seria desejável que o agente pudesse desenvolver a habilidade de evoluir para uma nova agenda, a partir de novas necessidades oriundas de aprendizado ou evolução.

v. Tempo Real

Apesar de não comprometer o resultado do Caso da Praia de Ingleses, em algumas situações pode vir a ser necessária a consideração do tempo real numa simulação.

vi. Crescimento e Morte

O protótipo não contempla nenhum mecanismo de crescimento e morte dos agentes ao longo da simulação. Considerando que o Modelo Conceitual aborda questões associadas à distribuição espacial, taxas de crescimento urbano, por exemplo, permitiriam projeções que, hoje, não são consideradas diretamente. Além disso, consolidaria o funcionamento dinâmico do sistema.

6.2 MODELO CONCEITUAL

Na definição do problema (item 1.2), foram propostas três questões relacionadas ao desenvolvimento do modelo conceitual, do protótipo e de seu teste por meio de um estudo de caso. A resposta a cada uma dessas questões é dada nos subitens que se seguem.

6.2.1 Viabilidade do Emprego de Lógica Difusa em MBA

A viabilidade do emprego de Lógica Difusa para Modelos Baseados em Agentes foi verificada por meio do conceito de *mapa mental*, sumarizado no Modelo Conceitual de um MBA Difuso (Figura 65). O protótipo demonstrou, apesar das limitações anteriormente apresentadas, que é possível simular processos espaciais dinâmicos, como a ocupação em zonas costeiras.

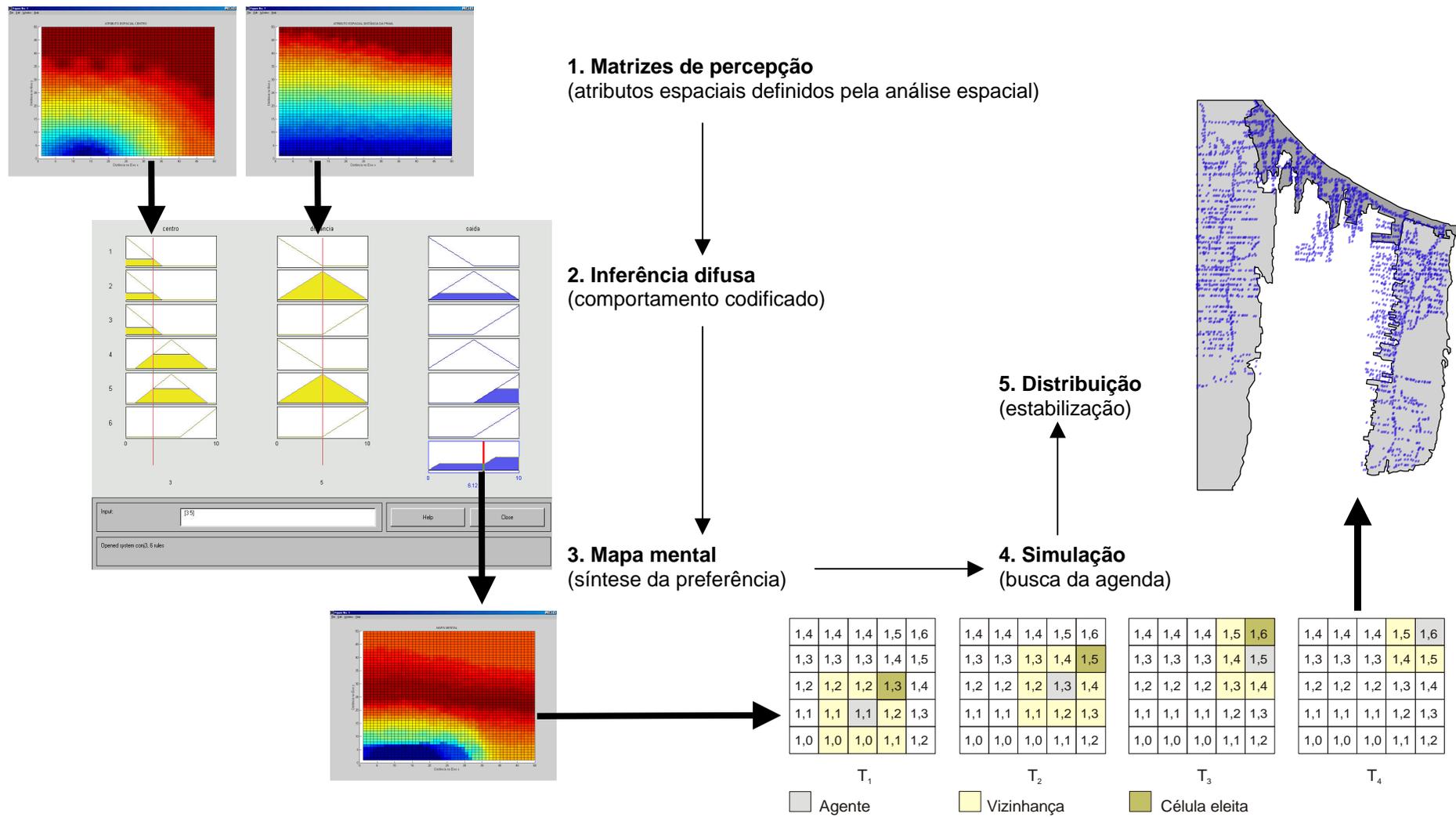


Figura 65. Sumário do modelo conceitual de um MBA Difuso.

6.2.2 Determinação de Comportamentos a Partir de Análise Espacial

A verificação da viabilidade do emprego de Lógica Difusa para Modelos Baseados em Agentes requereu a codificação dos comportamentos espaciais de dois tipos de agentes. Seus comportamentos foram obtidos por meio da análise espacial, comprovando, assim, a possibilidade do emprego desse tipo de análise para extração/abstração de percepções e comportamentos dos grupos de usuários.

No entanto, a determinação de comportamento não deve se restringir à análise espacial, sob pena de que ocorram erros na sua codificação. Esse problema pode ser visto na Figura 66, onde regras mal formuladas resultaram na estabilização do sistema com a distribuição final dos agentes bastante distante da encontrada nos dados reais. Para evitar esse tipo de situação, é recomendado ao modelador que leve em consideração informações obtidas em outras fontes que não a análise espacial.

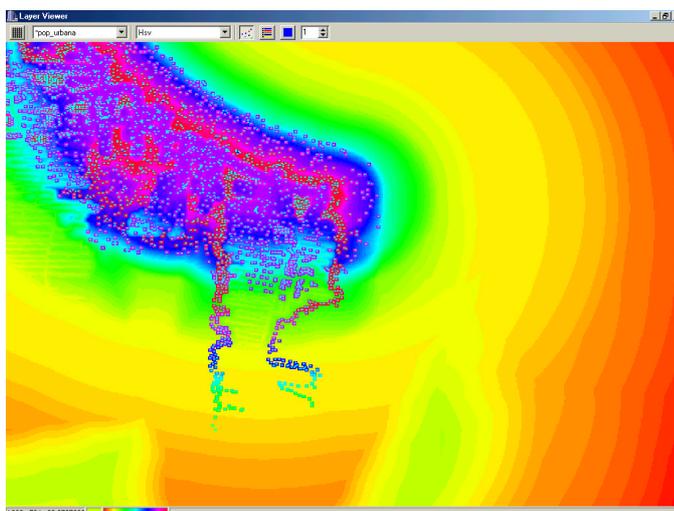


Figura 66. Exemplo de simulação com regras mal modeladas, resultando numa distribuição bastante distante da encontrada na realidade.

6.2.3 Similaridade das Simulações com a Realidade

O teste de similaridade conduzido para as Simulações I e II sacramenta os dois itens anteriores. Portanto, é viável aplicar Lógica Difusa em Modelos Baseados em Agentes, assim como é possível modelar o comportamento espacial de usuários da zona costeira a partir da análise espacial.

CAPÍTULO

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O que é a verdade senão aquilo que criamos a partir de nossas percepções, crenças e ilusões...

7.1 CONTRIBUIÇÕES

A aplicação da Teoria dos Conjuntos Difusos e da Lógica Difusa na modelagem de sistemas dinâmicos, como o proposto por este trabalho, encontra suporte em sua capacidade de lidar com o mundo real e com a percepção humana por meio do raciocínio aproximado. Essa característica oferece ao pesquisador a possibilidade de experimentar hipóteses com base em sua percepção e cognição, abrindo espaço para a consideração de fenômenos e/ou situações abstratas do mundo real que, normalmente, são desconsideradas pela incerteza associada.

Trabalhando com a percepção espacial e a ocupação (uso) da zona costeira por grupos de usuários, esta tese contribuiu para o estabelecimento de uma nova linha de estudo associada ao emprego de *mapas mentais*, gerados a partir de Sistemas Difusos, para estudos de processos espaciais. Ficou comprovado ao longo deste trabalho que o conceito de *mapa mental* não apenas é viável, como também poderá trazer significativos avanços aos estudos relacionados à percepção espacial do ser humano. De fato, essa é uma linha de estudo com grande potencial de aplicação em Sistemas de Informação Geográfica.

A união do conceito de Modelos Baseados em Agentes com Sistemas Difusos, com o emprego de *mapas mentais*, constitui a segunda importante contribuição desta tese. Este trabalho buscou contemplar os MBA com um mecanismo de codificação do comportamento que não se baseasse unicamente em números e equações, como em modelos numéricos, mas também em sua expressão por meio de linguagem natural.

Enquanto os MBA Difusos desenvolvidos na área de robótica empregam esta combinação unicamente para navegação em ambientes com obstáculos, esta tese faz uso da síntese da percepção espacial de cada agente diante de diversos atributos espaciais. Essa é uma importante inovação na construção de MBA, uma vez que abre espaço para aplicações em que preferências relacionadas às características espaciais (atributos) podem ser avaliadas.

Esse tipo de enfoque pode ser utilizado na administração de parques naturais, na avaliação, por exemplo, das áreas mais sensíveis ao impacto segundo a percepção e o perfil de comportamento do público que frequenta cada parque. Ou mesmo na consideração de possíveis áreas críticas à transgressão legal a partir da percepção e necessidade de usuários da zona costeira, conforme argumentado no estudo de caso.

O tema é novo, razão pela qual esta tese deixa em aberto as questões impostas pelas limitações do protótipo e do modelo conceitual em si. O enfoque espacial empregado no MBA Difuso não considera importantes mecanismos sociais e econômicos de natureza não espacial, bem como o relacionamento direto entre os agentes, o que restringe os aspectos dinâmicos da simulação. Essas limitações devem ser encaradas não como uma falha do modelo, mas como parte do processo de uma linha de pesquisa que trilha caminhos inexplorados. A utilização do *mapa mental* no molde proposto por esta tese, constitui-se num avanço para os Modelos Baseados em Agentes.

O esforço para a concretização de uma ferramenta híbrida capaz de lidar com a linguagem natural em MBA, por sua vez, ameniza qualquer impressão negativa deixada pelas limitações do modelo. Box (2000) acredita que os MBA ganharão mais adeptos à medida que as ferramentas de desenvolvimento tornarem-se mais comuns. Assim, a última contribuição desta tese encontra-se materializada no protótipo do simulador desenvolvido, o qual será disponibilizado a outros pesquisadores, que poderão testá-lo, indicando potenciais evoluções do modelo.

7.2 RECOMENDAÇÕES

As recomendações devem ser abordadas em duas linhas distintas: aquelas referentes à resolução de problemas existentes no protótipo, bem como à incorporação de novas funcionalidades nele; e aquelas associadas ao modelo conceitual em si.

7.2.1 Recomendações para o protótipo

As recomendações apresentadas neste item referem-se, em grande parte, às limitações do protótipo apresentadas no item 6.1.1, subitem “d”, e sugerem:

- a incorporação do efeito memória e da redefinição da representação do impacto na matriz de percepção;
- desenvolvimento de um “campo de visão” mais abrangente, com a possibilidade de determinação de sua extensão;
- verificação das possibilidades e viabilidade de sincronia entre o tempo da simulação e o tempo real;
- implementação de taxa de reprodução ou crescimento e morte para os agentes; e
- elaboração da “ajuda” ou de um tutorial para viabilizar a distribuição do simulador.

7.2.2 Recomendações para o modelo conceitual

As recomendações apresentadas neste item são de natureza mais complexa que as do item anterior. Elas abrangem importantes considerações para a evolução do modelo conceitual proposto pela tese, constituindo as próximas frentes de pesquisa nessa linha de modelagem:

- emprego de autômato celular para representação de processos dinâmicos disparados pela presença ou ação de agentes em um determinado local. Para Box (2000b), esse é um caminho natural de evolução dos MBA. Para o modelo proposto nesta tese, o emprego dessa técnica viabiliza a criação de matrizes de percepção e *mapas mentais* dinâmicos;

- implementação da comunicação direta entre agentes, que deve ser considerada não apenas diante dos aspectos funcionais do protótipo, mas também das alterações conceituais do modelo propriamente dito. Ou seja, deve ser respondida a questão de aonde quer se chegar com esse mecanismo;
- incorporação de regras de comportamento não espacial, que deve ser abordada sob a mesma perspectiva do item anterior;
- desenvolvimento de mecanismos/metodologia para definição dos atributos espaciais, dos conjuntos difusos e das regras de percepção para o modelo conceitual;
- consideração da necessidade e viabilidade de inclusão de mecanismos de evolução do comportamento dos agentes;
- estudo mais profundo das propriedades desse tipo de simulação, como a racionalidade limitada (mínimos e máximos locais), de modo a empregá-las na modelagem com maior ênfase; e
- exploração de novas frentes de aplicação que não o gerenciamento costeiro.

7.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A originalidade, a viabilidade e a não-trivialidade do modelo proposto encontram-se permeadas nos capítulos que compõem este documento de tese. Espera-se que as contribuições deste trabalho para a ciência sejam valorizadas por pesquisadores de áreas afins e que as recomendações propostas não se restrinjam ao esforço único do autor, mas que sejam possibilidades para outros pesquisadores explorarem o tema.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARDY, T. S. *Marine Protected Areas and Ocean Conservation*. Boston: Academic Press: 1997.

AIMAX. *Fuzzy Control, Fuzzy Inference, Fuzzy Rules, Linguistic Expressions, Conditions, Conclusions*. Disponível em: <http://www.ta-eng.com/industry/mforum/fuzzy/1_2.htm>. Acesso em: 20 out. 2001.

ANTONA, M.; BOUSQUET, F.; LEPAGE, C.; WEBER, J.; KARSENTY, A.; GUIZOL, P. Economic Theory of Renewable Resource Management: A Multi-agent Systems Approach. In: SICHMAN, J.; CONTE, R.; GILBERT, N. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. First International Workshop, MABS'98, Paris, France, July 1998, p. 61-78.

ARNHEITER, T. Modeling and simulation of an agent-based decentralized two-commodity power market. In: Fourth International Conference on MultiAgent Systems, 2000. *Proceedings...*, 2000. p. 361-362.

AXELROD, R. Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences: Obtaining, analyzing, and sharing results of computer models. *Complexity*, v. 3(2), p. 16-22, 1997.

AXTELL, R. L.; EPSTEIN, J. M. Coordination in Transient Social Networks: An Agent-Based Computational Model of the Timing of Retirement. Center on Social and Economic Dynamics. *Working Paper*, n. 1, May 1999.

BALL, G. L.; GIMBLETT, H. R. Spatial Dynamic Emergent Hierarchies Simulation and Assessment System. *Ecological Modelling*, v. 62, p. 107-121, 1992.

BENENSON, I. Multi-agent simulations of residential dynamics in the city. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 22(1), p. 25-42, 1998.

BLÁZQUEZ, J. G. M.; GÓMEZ-SKARMETA, A. F. *An Algorithm to translate from approximative to descriptive fuzzy rules*. Disponível em: <<http://citeseer.nj.nec.com/271346.html>>. Acesso em: 5 set. 2000.

BLOCH, I.; SAFFIOTTI, A. On the Representation of Fuzzy Spatial Relations in Robot Maps. In: 9th Int. Conf. on Information Processing and the Management of Uncertainty (IPMU). *Proceedings...*, Annecy, France, 2002. p. 1587-1594.

BOUSQUET, F.; LE PAGE, C.; BAKAM, I.; TAKFORAYAN, A. Multiagent simulations of hunting wild meat in a village in eastern Cameroon. *Ecological Modelling*, v. 138, p. 331-346, 2001.

BOX, P. W. Garage Band Science and Dynamic Spatial Models. *Journal of Geographical Systems*, v. 2, p. 49-54, 2000.

BOX, P. W. *Spatial Units as Agents: Making the Landscape an Equal Player in Agent-Based Simulations*. Disponível em: <<http://www.gis.usu.edu/~sanduku/papers/gisca/gisca.html>>. Acesso em: 22 abr 2000b.

BRADSHAW, J. M. (Ed.). *Software Agents*. California: AAAI Press/The MIT Press, 1997.

CABRAL, R. B. Adaptação Computacional de Sistemas de Inferência Difusos: Um Caso Aplicado. Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Ciência da Computação. Departamento de Informática e Estatística. Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1994.

CAIRNS, J.; CRAWFORD, R. *Integrated Environmental Management*. New York: Lewis Publishers: 1991.

CALLIARI, L. J.; ASMUS, M. L.; TAGLIANI, C. R.; REIS, E. G. Gerenciamento Costeiro Integrado - Trocas e Inter-Relações Entre os Sistemas Continental e Oceânico Adjacentes - Programa Train-Sea-Coast do Brasil. *Manual do Participante*, 2001.

CAMPELLO, R. J. G. G; AMARAL, W .C. Modeling and linguistic knowledge extraction from systems using fuzzy relational models. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 121, p. 113 -126, 2001.

CAMPOS, A. M. C.; HILL, D. R. C. *Web-Based Simulation of Agent Behaviors*. Disponível em: <<http://www.isima.fr/ecosim>>. Acesso em: 28 abril 2000.

CANESSA, R. R. GIS Decision Support for Integrated Coastal Management. PhD dissertation. *Ocean Conservation Report Series* – Department of Fisheries and Oceans, Canada, 1998.

CARPENTER, S. R.; BROCK, W. A.; HANSON, P. The Power of Politics in Agent-based Models of Ecosystem Management: Comment on “Ecological and Social Dynamics in Simple Models of Ecosystem Management”. *Conservation Ecology*, v. 3(2), 1999.

CASTIGLIONE, F. *Diffusion and Aggregation in an Agent Based Model of Stock Market Fluctuations*. Disponível em <<http://www.zpr.uni-oeln.de/~filippo/papers/castiglione2/castiglione.html>>. Acesso em: 4 maio 2000.

CHARTERIS, P. L. *Assessing industry-wide impact of beef cattle genetic technologies*. Disponível em: <<http://ansci.colostate.edu/ran/beef/bif2001.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2001.

CHRISTOFOLETTI, A. *Modelagem de Sistemas Ambientais*. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

CINCIN-SAIN, B. Sustainable Development and Integrated Coastal Management. *Ocean & Coastal Management*, v. 21, p. 11- 43, 1993.

CINCIN-SAIN, B.; KNECHT, R. *Integrated Coastal and Ocean Management: Concepts and Practices*. Washington, D.C.: Island Press, 1998.

CLARK, J. R. *Coastal Zone Management Handbook*. New York: Lewis Publishers Inc., 1996.

COCKLIN, C.; BLUNDEN, G. Suitability, Water Resources and Regulation. *Geoforum*, v. 29(1), p. 51-68, 1998.

COMMON, M.; NEUMANN, U. Agent Based Simulation Modeling for Sustainability Analysis: Introducing Irreversibility and Precautionary Behaviour to the Sugarscape. Disponível em: <<http://homepages.strath.ac.uk/~cds98101/agent1.html>>. Acesso em: 14 abr 2000.

CONSTANZA, R.; WAINGER, L.; BOCKSTAEL, N. Integrating Spatially Explicit Ecological and Economical Models. In *Getting Down to Earth: Practical Applications of Ecological Economics*. Constanza, R.; Segura, O.; Martinez-Alier, J. (Eds.). Island Press, Washington D.C., p. 249 - 284, 1996.

CONTE, R. Diversity in strategies of Partnership Formation. In *Tools and Techniques for Social Science Simulation*. Suleiman, R.; Troitzsch, K. G.; Gilbert, N. (Eds.). Heidelberg: Physica-Verlag, New York, p. 131 - 148, 2000.

DANIELS, M. *An open framework for agent-based modeling*. Disponível em: <<http://www.santafe.edu/~mgd/lanl/framework.html>>. Acesso em: 21 out. 2000.

DAVIS, D. N. Agent-based decision-support framework for water supply infrastructure rehabilitation and development. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 24(3), p. 173-190, 2000.

DEADMAN, P. Modelling individual behaviour and group performance in an intelligent agent-based simulation of the tragedy of the commons. *Journal of Environmental Management*, v. 56(3), p. 159-173, 1999.

DEADMAN, P., E SCHLAGER; H. R. GIMBLETT. Simulating Common Pool Resource Management Experiments with Adaptive Agents Employing Alternate Communication Routines. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, v.3 (2), 2000.

DEADMAN, P.; BROWN, R. D.; Gimblett, H. R. Modelling Rural Residential Settlement Patterns with Cellular Automata. *Journal of Environmental Management*, v. 37, p. 147-160, 1993.

DEADMAN, P.; GIMBLETT, H. R. The Role of Goal-Oriented Autonomous Agents in Modeling People-Environment Interactions in Forest Recreation. *Mathematical and Computer Modelling*, v. 20 (8), 1994.

DECKER, E. H. *Self-Organizing Systems*. Disponível em: <<http://algodones.unm.edu/~ehdecker/sos/sos.html>>. Acesso em: 11 fev. 1997.

DRAGICEVIC, S.; MARCEAU, D. J. An Application of Fuzzy Logic Reasoning for GIS Temporal Modeling of Dynamic Processes. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 113, p. 69 - 80, 2000.

DUFFY, J. Learning to speculate: Experiments with artificial and real agents. *Journal of Economic Dynamics and Control*, v. 25(3-4), p. 295-319, 2001.

EDMONDS, B. What is Complexity? - The philosophy of complexity per se with application to some examples in evolution, in F. Heylighen; D. Aerts (Eds.): *The Evolution of Complexity*, Kluwer, Dordrecht, 1999.

EPSTEIN, J; AXTELL, R. Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up. Cambridge, MA: MIT Press, 1996.

EROL, K., LEVY, R.; WENTWORTH, J. *Application of Agent Technology to Traffic Simulation*. Disponível em: <<http://www.tfsrc.gov/advanc/agent.htm>>. Acesso em: 14 set. 2000.

FERBER, J. *Multi-Agent System: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Harlow, England: Addison-Wesley, 1999.

FERRAND, N. Modelling and Supporting Multi-Actor Spatial Planning Using Multi-Agents Systems. In: Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling . *Proceedings...* January 21-25, 1996, Santa Fe, New Mexico, USA.

FONTANA, W.; BALLATI, S. Complexity: Why the sudden fuss? *Complexity*, v.4 (3), p. 14-16, 1999.

FORD, A. *Modeling the Environment: an Introduction to System Dynamics Modeling of Environmental Systems*. Washington, D.C.: Island Press, 1999.

FOTHERINGHAM. A. S.; WEGENER, M. *Spatial Models and GIS: New Potentials and New Models*. London: Taylor & Francis, 2000.

FRANKLIN, S.; GRAESSER, A. Is it an Agent, or just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents. In: Mueller, J. P.; Wooldridge, M. J.; Jennings, N. R.(Ed.). *Intelligent Agents III*. Berlin, Springer: 1997.

GARCÍA, C. G. Artificial Society of Intelligent Agents. Tese de Doutorado submetida à Fundação Arturo Rosenblueth, México, 2001.

GIMBLETT H. R.; RICHARDS, M.; ITAMI, R. M. A Complex Systems Approach to Simulating Human Behaviour Using Synthetic Landscapes. *Complexity International Journal*, v.6, 1998.

GIMBLETT, H. R. A Complex Systems Approach to Simulating Human Behaviour Using Synthetic Landscapes. *Complexity International*, v. 6, 1998.

GIMBLETT, H. R. Simulating Recreation Behaviour. In: *Complex Wilderness Landscapes Using Spatially-Explicit Autonomous Agents*. Unpublished dissertation. University of Melbourne, Parkville, Australia, 1997.

GIMBLETT, H. R. Virtual Ecosystems. *AI Applications in Natural Resources, Agriculture, and Environmental Science Journal*, v.8 (1), p. 77-81, 1994.

GIMBLETT, H. R.; DURNOTA, B.; ITAMI, R. M. Some Practical Issues in Designing and Calibrating Artificial Human-Recreator Agents in GIS-based Simulated Worlds. Workshop on Comparing Reactive (ALife-ish) and Intentional Agents. *Complexity International Journal*, v.3, 1997b.

GIMBLETT, H. R.; DURNOTA, B.; ITAMI, R. M. Spatially-Explicit Autonomous Agents for Modelling Recreation Use in Complex Wilderness Landscapes. *Complexity International Journal*, v.3, 1997.

GIMBLETT, H. R.; T. C. DANIEL; ROBERTS, C. Grand Canyon River Management: Simulating Rafting the Colorado River through Grand Canyon National Park Using Spatially Explicit Intelligent Agents. In: *4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs*, Banff, *Proceedings...* Alberta, Canada, September 2-8, 2000.

GIMBLETT, H. R.; R. M. ITAMI. Modelling the Spatial Dynamic and Social Interaction of Human Recreators Using GIS and Intelligent Agents. In: *International Congress on Modelling and Simulation. Proceedings...* Hobart, Tasmania. December 8-11, 1997.

GRANT, W. E.; PEDERSEN, E. K.; MARÍN, S. L. *Ecology and Natural Resource Management: Systems Analysis and Simulation*. New York: John Wiley & Sons: 1997.

GREENS, D. G.; KLOMP, N. I. *Environmental informatics - a new paradigm for coping with complexity in nature*. Disponível em:
<<http://life.csu.edu.au/complex/ci/vol6/green/>>. Acesso em: 25 jun. 2000.

HAGENAH, E. A regulatory view on science and predictive models. *Environmental Pollution*, v. 100 (1-3), p. 13-18, 1999.

HARDIN, G. The tragedy of the commons. *Science*, v. 162, p. 1243-1248, 1968.

HAUSKER, K. *Reinventing Environmental Regulation: The Only Path to a Sustainable Future*. *Environmental Law Reporter*. Disponível em:
<<http://www.csis.org/html/op990301.html>>. Acesso em: 22 out. 1999.

HAVINGA, H.N.J.; VEER, P.; BROUWER, R.; CSER, J. Fuzzy Logic. Report for Hoogheemraadschap van de Alblasterwaard en de Vijfheerenlanden. *Proceedings Faculty of Civil Engineering and Geosciences, TU Delft*, 1999. ...

HAYES-ROTH, B. An Architecture for Adaptive Intelligent Systems. *Artificial Intelligence*, v. 75, p. 329-365, 1995.

HERMANS, B. *Intelligent Software Agents on the Internet: an inventory of currently offered functionality in the information society & a prediction of (near-) future developments*. PhD Dissertation, Tilburg, 1996.

HOLT. Understanding Environmental and Geographical Complexities through Similarity Matching. *Complexity International*, v. 7, 2000.

HOOD, L. *Agent Based Modelling*. Disponível em: <http://www.brs.gov.au/social_sciences/kyoto/hood2.html>. Acesso em: 11 abril 2000.

HOOGENDOORN, S.; HOOGENDOORN-LANSER, S.; SCHUURMAN, H. *Fuzzy Perspectives in Traffic Engineering*. Holand: Transport Research Center of the Dutch Ministry of Transport (AVV), 2000.

HRABER, P. T.; MILNE, B. T. Community assembly in a model ecosystem. *Ecological Modelling*, v. 103(2-3), p. 267-285, 1997.

HRABER, P. T.; MILNE, B. T. Community assembly in a model ecosystem. *Ecological Modelling*, v. 103 (2-3), p. 267-285, 1997.

IBA, T.; TAKENAKA, H.; TAKEFUJI, Y. Agent-based artificial market model-the case study of de-facto standard on VCR market, 1998. International Conference on Multi Agent Systems, p. 437 –438. *Proceedings...*

ISHINISHI, M.; NAMATAME, A. Testbed for artificial markets. Systems, Man, and Cybernetics, 1999. In IEEE SMC '99 , v. 2 p. 610 -615. *Proceedings...*

ITAMI, R. M.; MACLAREN, G. S.; K. M. HIRST, RAULINGS, R. J.; GIMBLETT, H. R. RBSIM 2: Simulating human behavior in National Parks in Australia: Integrating GIS and Intelligent Agents to predict recreation conflicts in high use natural environments. In: 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs, Banff, Alberta, Canada, September 2-8, 2000. *Proceedings...*

ITAMI, R. M.; GIMBLETT, H. R. Intelligent recreation agents in a virtual GIS world. *Complexity International*, v. 8, 2001.

JAGER, W.; JANSSEN, M. A.; DE VRIES, H. J. M.; DE GREEF, J.; VLEK, C. A. J. Behaviour in commons dilemmas: Homo economicus and Homo psychologicus in an ecological-economic model. *Ecological Economics*, v. 35, p. 357–379, 2000.

JANSSEN, M. A.; CARPENTER, S. R. Managing the Resilience of Lakes: A multi-agent modeling approach. *Conservation Ecology*, v.3(2), 1999.

JANSSEN, M.; DE VRIES, B. The battle of perspectives: a multi-agent model with adaptive responses to climate change. *Ecological Economics*, v. 26(1), p. 43-65, 1998.

JENNINGS, N. R. On agent-based software engineering. *Artificial Intelligence*, v. 117, p. 277-296, 2000.

JENNINGS, N. R.; SYCARA, K.; WOOLDRIDGE, M. A Roadmap of Agent Research and Development. *Int Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, v. 1 (1), p. 7-38, 1998.

JENNINGS, N. R.; WOOLDRIDGE, M. Agent-Oriented Software Engineering. In: *Handbook of Agent Technology* (ed. J. Bradshaw). AAAI/MIT Press, 2002 [no prelo]

JENNINGS, N. R.; WOOLDRIDGE, M. Applications of Intelligent Agents. In: *Agent Technology Foundations, Applications and Markets* Jennings, N. R.; Wooldridge, M (Ed). Heidelberg: Springer-Verlag, 1998.

JENTOFT, S.; MCCAY, B. J.; WILSON, D. C. Social Theory and Fisheries Co-management. *Marine Policy*, v. 22 (4-5), p. 423-436, 1998.

JOHNSON, P.; LANCASTER, A. *Swarm User Guide*. Disponível em: <<ftp://ftp.swarm.org/pub/swarm/userbook-0.9.tar.gz>>. Acesso em: 2 mar. 2000.

JØRGENSEN, S. E. *Fundamentals of Ecological Modelling*. (2nd Ed.). Developments in Environmental Modelling 19. Amsterdam: Elsevier, 1994.

KLIR, G. J.; St. CLAIR, U. H.; YUAN, B. *Fuzzy set theory; Foundations and applications*. New Jersey, Prentice Hall, 1997.

KLIR, G.J.; YUAN, B. *Fuzzy sets and fuzzy logic; theory and applications*. New Jersey: Prentice Hall: 1995.

KOHLER, T. A. *Agent-Based Modeling of Anasazi Village Formation in The Northern American Southwest*. Disponível em: <<http://www.santafe.edu/~carr/model/paper.html>>. Acesso em: 29 jul. 1998.

KOHLER, T. A.; VAN WEST, C. R.; CARR, E. P.; LANGTON, C. G. *Agent-Based Modeling of Prehistoric Settlement Systems in The Northern American Southwest*. Disponível em: <http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/santa_fe_cd-room/sf_papers/kohler_tim/kohler.html>. Acesso em: 29 jul. 1998.

KOŁODZIEJ, C.; PRIEMER, R. Synthesis of fuzzy controllers that achieve linguistic performance objectives. *Journal of the Franklin Institute*, v. 336, p. 983-1005, 1999.

LANGTON, C. *History of Swarm*. Disponível em: <<http://www.santafe.edu/projects/swarm/swarmfest99-tutorial/SectionOne-99/tsld006.htm>>. Acesso em: 22 abr 2001.

LAUGHLIN, C. *The Fuzzy Brain*. Disponível em: <<http://www.carleton.ca/~claughli/fuzzy.htm>>. Acesso em: 13 maio 2000.

LIGTENBERG, A.; BREGT, A. K.; LAMMEREN, R. Multi-Actor-Based Land Use Modelling: spatial planning using agents. *Landscape and Urban Planning*, v. 56, p. 21 - 33, 2001.

LISSACK, M. R. Complexity - the Science, its Vocabulary, and its Relation to Organizations. *Emergence*, v. 1 (1), 1999.

MACY, M. W.; WILLER, R. *From Factors to Actors: Computational Sociology and Agent-Based Modeling*. Disponível em: <http://www.spc.uchicago.edu/info/From_Factors_to_Actors.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2001.

MAES, P. Modeling Adaptive Autonomous Agents. In *Artificial Life, An Overview*. Langton, C. G. (Ed.). Cambridge, MIT Press, 1995.

MALHOTRA, Y. *On Science, Scientific Method And Evolution Of Scientific Thought: A Philosophy Of Science Perspective Of Quasi-Experimentation*. Disponível em: <<http://www.brint.com/papers/science.htm>>. Acesso em: 9 jun 2002.

MANIKONDA, V.; LEVY, R.; SATAPATHY, G.; LOVELL, D. J.; CHANG, P. C.; TEITTINEN, A. *Autonomous Agents for Traffic Simulation and Control*. Disponível em: <<http://www.engr.umd.edu/~lovell/manlevsatlovchatei.html>>. Acesso em: 12 maio 2000.

MANSILLA, R. From naive to sophisticated behavior in multiagents-based financial market models. *Physica A*, v. 284, p. 478-488, 2000.

MANSON, S. M. Agent-based Dynamic Spatial Simulation of Land-Use/Cover Change: Methodological Aspects. In: 2000 UCGIS Summer Assembly, Oregon State University, June 21-24, 2000. *Proceedings...*

MANSON, S. M. Agent-based dynamic spatial simulation of land-use/cover change in the Yucatán peninsula, Mexico. In: 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs. Banff, Alberta, Canada, September 2 - 8, 2000b. *Proceedings...*

MARCENAC, P. Emergence of Behaviours in Natural Phenomena Agent-Simulation. *Complexity International*, v. 3, 1996.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. *Metodologia do Trabalho Científico*. São Paulo: Ed. Atlas: 2001.

MEYERS, F. Introduction to ArcView. *Lecture Notes*. University of South Florida. 2000.

MICHAUD, F.; LACHIVER, G.; DINH, C. T. L. (1996). Fuzzy Selection and Blending of Behaviors for Situated Autonomous Agent. In: IEEE Int'l Conf. on Fuzzy Systems, New Orleans, Sept. 1996. *Proceedings...*

MINSKY, M. *The Society of Mind*. New York: Simon & Schuster, 1985.

MOROWITZ, H. Chaos, Emergence, and Life: Fresh ideas raise familiar questions. *Complexity*, v. 4(2), p. 13-14, 1998.

NORSE, E. A. Global Marine Biological Diversity Strategy: Building Conservation into Decision Making. *Center for Marine Conservation*, Washington, DC, 1993.

NWANA, H. S. Software Agents: An Overview. *Knowledge Engineering Review*, v. 11 (3), p. 1 - 40, 1996.

NWANA, H. S.; NDUMU, D. T. A Perspective on Software Agents Research. *Knowledge Engineering Review*, v. 14 (2), p. 1-18, 1999.

OLIVEIRA, E; FISCHER, K; STEPANKOVA, O. Multi-agent systems: which research for which applications. *Robotics and Autonomous Systems*, v. 27 (1-2), p. 91-106, 1999.

ORBACH, M. Chapter 12: Ecology and Public Policy. In: *Ecosystems Functions and Human Activities*. SIMPSON, R. D.; CHRISTENSEN, N. L. New York: Chapman and Hall, 1997.

OTTER, H. S.; VEEN, A.; VRIEND, H. J. ABLOoM: Location behaviour, spatial patterns, and agent-based modelling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, v. 4(4), 2001.

PANEPENTO, P. The perfect swarm. *Computerworld*, v. 34(33), p. 59, 2000.

PARROTT, L.; KOK, R. Incorporating Complexity in Ecosystem Modelling. *Complexity International*, v.7, 2000.

PERNETTA, J.; ELDER, D. Cross-sectoral, Integrated Coastal Area Planning (CICAP): Guidelines and Principles for Coastal Area Development. A Marine Conservation and Development Report. IUCN, Gland, Switzerland, 1993.

POLETTE, M., RAUCCI, G. D., CARDOSO, R. C. Methodological Subsídies for Beach Carrying Capacity - Study Case: Central Balneário Camboriú Beach- SC (BRAZIL) In: *Coastal Zone Canada 2000*, 2000, Saint John, 2000. v. *Proceedings*.

PRITCHARD, L. Jr.; SANDERSON, S. The power of politics in agent-based models of ecosystem management: Comment on "Ecological and Social Dynamics in Simple Models of Ecosystem Management" by S. R. Carpenter, W. A. Brock, and P. Hanson. *Conservation Ecology*, v. 3(2): 9, 1999.

ROCHA, I. O.; LOPES, L. J. Gerenciamento Costeiro de Santa Catarina: levantamento de problemas sócio-econômicos dos municípios dos setores Sul e Centro. In: *3a Reunião Especial da SBPC, Anais...*, 1996, Florianópolis.

ROCHA, L. M. BITS: Computer and Communications News. *Computing, Information, and Communications Division. Los Alamos National Laboratory*. November, 1999.

RODDY, K. A.; DICKSON, M. R. Modeling Human and Organizational Behavior using a Relation-Centric Multi-Agent System Design Paradigm. Master Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2000.

RODRIGUES, A., RAPER, J.; CAPITÃO, M. *Development of Intelligent Spatial Agents*. Disponível em: <<http://helios.cnig.pt/~armanda/html/spatial95.html>>. Acesso em: 3 ago. 1998.

RODRIGUES, A; GRUEAU, C., RAPER, J.; NEVES, N. Environmental Planning using Spatial Agents. Disponível em:
<<http://helios.cnig.pt/~bestgis/papers/html/gisruk.html>>. Acesso em: 3 ago. 1998.

RODRIGUES, A; GRUEAU, C., RAPER, J.; NEVES, N. Research on Spatial Agents. *Proceedings of the Third Joint European Conference on Geographic Information (JEC_GI'97)*, Vienna, 16-18 April, 1997.

RODRIGUES, A; RAPER, J. *Defining Spatial Agents*. Disponível em:
<<http://helios.cnig.pt/~armanda/html/livro.html#cengeloglu>>. Acesso em: 3 ago. 1998.

RODRIGUES, A; RAPER, J. *Implementing Intelligent Agents for Spatial Information*. Disponível em: <<http://helios.cnig.pt/~armanda/html/jec95.html>>. Acesso em: 3 ago. 1998b.

ROSIN, A. P.; LAFIN, N. A.; SPERB, R. M. Estudo de Caso: Efeitos do Desenvolvimento Costeiro Sobre as Áreas de Proteção Permanente (Código Florestal). In: Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, Itajaí, 28 a 01 maio de 2002. Anais...

ROUCHIER, J; BOUSQUET, F.; REQUIER-DESJARDINS, M.; ANTONA, M. A multi-agent model for describing transhumance in North Cameroon: Comparison of different rationality to develop a routine. *Journal of Economic Dynamics and Control*. v. 25(3-4), p. 527-559, 2001.

RUFINO, G. D. Gerenciamento costeiro: aspectos legais. Relatório para programa das Nações Unidas, 1990.

SAARENMAA, H.; GIMBLETT, H. R. Preface to the Special Issue on Object-Oriented Modelling of Natural and Artificial Agents in Ecosystem and Natural Resource Management. *Mathematical and Computer Modelling*, v.19 (9), 1994.

SAC - Strategic Assessment Center. Agent-Based Modeling. Disponível em:
<http://sac.saic.com/am/docs/agent_based_modeling_paper/agent_based_modeling.htm>. Acesso em: 11 maio 1999.

SAFFIOTTI, A. Fuzzy Logic in Autonomous Navigation. In: Driankov, D.; Saffiotti, A. (Eds.), *Fuzzy Logic Techniques for Autonomous Vehicle Navigation*. DE: Springer, 2001.

SAFFIOTTI, A. Using Fuzzy Logic for Autonomous Robotics: an on-line workshop. *The Knowledge Engineering Review*, v. 12 (1), p. 91 - 94, 1997.

SAFFIOTTI, A.; RUSPINI, E. H. Global Team Coordination by Local Computation. Proc. of the European Control Conference (ECC). Porto, Portugal, 2001.

SANDERS, L.; PUMAIN, D.; MATHIAN, H.; GUÉRIN-PACE, F.; BURA, S. Simulation de l'Évolution du Peuplement par lês Systèmes Multi-Agents. *Bulletin de l'Association de Gêographes Francais*, v. 4, p. 385 - 396, 1997.

SANTOS, E. I. Métodos e técnicas da pesquisa científica. São Paulo: Impetus, 2000.

SCHNEIDER, M.; KANDEL, A.; LANGHOLZ, G.; CHEW, G. *Fuzzy Expert System Tools*. New York: John Wiley & Sons, 1996.

SCHUT, M.; WOOLDRIDGE, M. The Control of Reasoning in Resource-Bounded Agents. *Knowledge Engineering Review*, 2001.

SIEG, G. A political business cycle with boundedly rational agents. *European Journal of Political Economy*, v. 17, p. 39-52, 2001.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação. UFSC/PPGEP/LED, Segunda Edição, Florianópolis, 2001.

SILVA, H. L. *Apostila: Produção do conhecimento científico*. PPGEP, UFSC, 2001.

SKARMETA, A. G.; BARBERÁ, H. M.; ALONSO, M. S. A Fuzzy Agents Architecture for Autonomous Mobile Robots. Disponível em: <<http://citeseer.nj.nec.com/skarmeta99fuzzy.html>>. Acesso em: 11 abr. 1999.

SOEPBOER, W. CLUE-S: An application for Sibuyan Island, The Philippines. Wageningen University. *Notes of the Laboratory of Soil Science and Geology*, Holland, 2001.

SORENSEN, J. C.; MCCREARY, S. T. Institutional Arrangements for Managing Coastal Resources and Environments (2nd Edition). *Coastal Management Publication #1, Renewable Resources Publication Series*, Switzerland, 1990.

SPERB, R. M.; PACHECO, R. C. S.; KHATOR, R. Legal and Socioeconomic Dynamics in Coastal Zone Management: Agent-based Modeling of Spatial Processes. In: *COASTGIS 2001*, 2001, Halifax. *Proceedings...*

STANDISH, R. K. On Complexity and Emergence. *Complexity International*, v. 9, p. 1 - 6, 2001.

TERNA, P. Creating Artificial Worlds: A Note on Sugarscape and Two Comments. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, v. 4(2), 2001.

TERNA, P. Simulation Tools for Social Scientists: Building Agent-based Models with Swarm. *Journal of Artificial Societies & Social Simulation*, v. 1(2), 1998.

TESFATSION, L. Agent-Based Computational Economics: Growing Economies from the Bottom Up. *ISU Economics Working Paper No. 129*, Jan. 2002.

TESFATSION, L. Introduction to the special issue on agent-based computational economics. *Journal of Economic Dynamics and Control*, v. 25(3-4), p. 281-293, 2001.

TESFATSION, L. Structure, behavior, and market power in an evolutionary labor market with adaptive search. *Journal of Economic Dynamics and Control*, v. 25(3-4), p. 419-457, 2001b.

THÉBAUD, O.; LOCATELLI, B. Modelling the emergence of resource-sharing conventions: an agent-based approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, v. 4(2), 2001.

TILLMAN, D.; LARSEN, T. A.; PAHL-WOSTL, C.; GUJER, W. Modeling the Actors in Water Supply Systems. *Water Science and Technology*, v.39 (4), p. 203-211, 1999.

TSOURVELOUDIS, N. C.; VALAVANIS, K. P.; HEBERT, T. Autonomous Vehicle Navigation Utilizing Electrostatic Potential Fields and Fuzzy Logic. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v. 17(4), p. 490-497, 2001.

TURCHIN, V.; HEYLIGHEN, F.; JOSLYN, C.; BOLLEN, J. Control. Disponível em: <<http://pespmc1.vub.ac.be/CONTROL.html>>. Acesso em: 9 jun. 2001.

TURNER, R. M. The Tragedy of the Commons and Distributed AI Systems. Proceedings of the 12th International Workshop on Distributed Artificial Intelligence, University of New Hampshire - *Computer Science Department Technical Report*, 1993.

UNCED - United Nations Conference on Environment and Development. Agenda 21. Rio de Janeiro, 1992.

VEGA-REDONDO, F. Unfolding Social Hierarchies. *Journal of Economic Theory*, v. 90(2), p. 177-203, 2000.

VOINOV, A.; COSTANZA, R.; WAINGER, L.; BOUMANS, R.; VILLA, F.; MAXWELL, T.; VOINOV, H. Patuxent Landscape Model: Integrated Ecological Economic Modeling of a Watershed. *Environmental Modelling & Software Journal*, v. 14 (5), p. 473-491, 1999.

WANG, P. *The Interpretation of Fuzziness*. Disponível em: <<http://citeseer.nj.nec.com/wang96interpretation.html>>. Acesso em: 10 out. 2000.

WCC. World Coast Conference Report : Preparing to meet the coastal challenges of the 21st century. *World Coast Conference*, Noordwijk, the Netherlands, 1993.

WEIDE, J. A. Systems View of Integrated Coastal Management. *Delft Hydraulics Publications Series*, Delft, 1994.

WHITE, D. A. Controlled Simulation of Marriage Systems. *Journal of Artificial Societies & Social Simulation*. Disponível em: <<http://www.soc.surrey.ac.uk/jasss/jasss.html>>. Acesso em: 22 ago. 1999.

WIKIPEDIA. *Scientific_method*. Disponível em: <http://www.wikipedia.com/wiki/Scientific_method>. Acesso em: 12 ago. 2002.

WOLFS, F. *Scientific Method*. Oxford, England. Disponível em: <http://teacher.nsr.rochester/phy_labs/appendix>. Acesso em: 1 jul. 2000.

WOOLDRIDGE, M. J.; JENNINGS, N. R. Intelligent Agents: Theory and Practice. *The Knowledge Engineering Review*, v. 10 (2), p. 115-152, 1995.

WOOLDRIDGE, M. J.; JENNINGS, N. R.; KINNY, D. The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, The Netherlands, v. 3, p. 285-312, 2000.

WOOLFSON, M. M.; PERT, G. J. *An Introduction to Computer Simulation*. Oxford: Oxford University Press, 1999.

YOUNG, M. J. Agent-Based Modeling and Behavioral Representation. *Air Force Research Laboratory's Human Effectiveness Directorate*. Disponível em: <<http://www.afrlhorizons.com/Briefs/0006/HE0009.html>>. Acesso em: 8 maio 2000.

ZADEH, L. A. From computing to real world. Disponível em: <www.cse.cuhk.edu.hk/~iee/DVPZadeh_seminar.pdf>. Acesso em: 27 maio 1999.

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. *Information and Control*, v. 8, p. 338-353, 1965.

ANEXOS

A - DEFINIÇÕES DE AGENTES

Definições de agentes apresentadas por Franklin e Graesser (1997).

The MuBot Agent: "The term agent is used to represent two orthogonal concepts. The first is the agent's ability for autonomous execution. The second is the agent's ability to perform domain oriented reasoning." This pointer at definitions comes from an online white paper by Sankar Virdhagriswaran of Crystaliz, Inc., defining mobile agent technology. Autonomous execution is clearly central to agency.

The AIMA Agent: "An agent is anything that can be viewed as perceiving its environment through sensors and acting upon that environment through effectors." AIMA is an acronym for "Artificial Intelligence: a Modern Approach," a remarkably successful new AI text that was used in 200 colleges and universities in 1995. The authors were interested in software agents embodying AI techniques. Clearly, the AIMA definition depends heavily on what we take as the environment, and on what sensing and acting mean. If we define the environment as whatever provides input and receives output, and take receiving input to be sensing and producing output to be acting, every program is an agent. Thus, if we want to arrive at a useful contrast between agent and program, we must restrict at least some of the notions of environment, sensing and acting.

The Maes Agent: "Autonomous agents are computational systems that inhabit some complex dynamic environment, sense and act autonomously in this environment, and by doing so realize a set of goals or tasks for which they are designed." Pattie Maes, of MIT's Media Lab, is one of the pioneers of agent research. She adds a crucial element to her definition of an agent: agents must act autonomously so as to "realize a set of goals." Also environments are restricted to being complex and dynamic. It's not clear whether this rules out a payroll program without further restrictions.

The KidSim Agent: "Let us define an agent as a persistent software entity dedicated to a specific purpose. 'Persistent' distinguishes agents from subroutines; agents have their own ideas about how to accomplish tasks, their own agendas. 'Special purpose' distinguishes them from entire multifunction applications; agents are typically much smaller." The authors are with Apple. The explicit requirement of persistence is a new and important addition here. Though many agents are "special purpose" we suspect this is not an essential feature of agency.

The Hayes-Roth Agent: Intelligent agents continuously perform three functions: perception of dynamic conditions in the environment; action to affect conditions in the environment; and reasoning to interpret perceptions, solve problems, draw inferences, and determine actions. Barbara Hayes-Roth of Stanford's Knowledge Systems Laboratory insists that agents reason during the process of action selection. If reasoning is interpreted broadly, her agent architecture does allow for reflex actions as well as planned actions.

The IBM Agent: "Intelligent agents are software entities that carry out some set of operations on behalf of a user or another program with some degree of independence or autonomy, and in so doing, employ some knowledge or representation of the user's goals or desires." This definition, from IBM's Intelligent Agent Strategy white paper, views an intelligent agent as acting for another, with authority granted by the other. A typical example might be an information gathering agent, though the white paper talks of eight possible applications. Would you stretch "some degree of independence" to include a payroll program? What if it called itself on a certain day of the month?

The Wooldridge & Jennings Agent: "... a hardware or (more usually) software-based computer system that enjoys the following properties:

- autonomy: agents operate without the direct intervention of humans or others, and have some kind of control over their actions and internal state;
- social ability: agents interact with other agents (and possibly humans) via some kind of agent-communication language;
- reactivity: agents perceive their environment, (which may be the physical world, a user via a graphical user interface, a collection of other agents, the INTERNET, or perhaps all of these combined), and respond in a timely fashion to changes that occur in it;
- pro-activeness: agents do not simply act in response to their environment, they are able to exhibit goal-directed behaviour by taking the initiative."

The Wooldridge and Jennings definition, in addition to spelling out autonomy, sensing and acting, allows for a broad, but finite, range of environments. They further add a communications requirement. What would be the status of a payroll program with a graphical interface and a decidedly primitive communication language?

The SodaBot Agent: "Software agents are programs that engage in dialogs [and] negotiate and coordinate transfer of information." SodaBot is a development environment for software agent being constructed at the MIT AI Lab by Michael Coen. Note the apparently almost empty intersection between this definition and the preceding seven. we say "apparently" since negotiating, for example, requires both sensing and acting. And dialoging requires communication. Still the feeling of this definition is vastly different from the first few, and would seem to rule out almost all standard programs.

The Foner Agent: Foner requires much more of an agent. His agents collaborate with their users to improve the accomplishment of the users' tasks. This requires, in addition to autonomy, that the agent dialog with the user, be trustworthy, and degrade gracefully in the face of a "communications mismatch." However, this quick paraphrase doesn't do justice to Foner's analysis.

The Brustoloni Agent: "Autonomous agents are systems capable of autonomous, purposeful action in the real world." The Brustoloni agent, unlike the prior agents, must live and act "in the real world." This definition excludes software agents and programs in general. Brustoloni also insists that his agents be "reactive p; that is, be able to respond to external, asynchronous stimuli in a timely fashion."

B - SCRIPT DE CONFIGURAÇÃO PARA A SIMULAÇÃO II

```
#####  
# Ocupação da Praia de Ingleses  
# a partir de dois atributos espaciais:  
# zonas (urbana e periferia) e estradas  
#  
# - População Urbana: 1591  
# - População Rural: 2374  
#  
# - Regras abstraídas da observação  
# de fotos aéreas (1978, 1995 e 1998)  
# - Conjuntos por atributos: 6  
# - Número de Regras por agente: 20  
# - Regras da proximidade da estrada original  
#  
# Modelador: Rafael M. Sperb  
#####  
Project Ingleses  
{  
  grid: (500,400)  
  layer Ingleses  
  {  
    default: 0  
    range: (0,180)  
    data: "mapa.map"  
  }  
  layer Centro  
  {  
    default: 0  
    range: (0,256)  
    data: "base.map"  
  }  
  layer Periferia  
  {  
    default: 0  
    range: (0,256)  
    data: "periferia3.map"  
  }  
  layer Estrada  
  {  
    default: 0  
    range: (0,256)  
    data: "Estradas_98.map"  
  }  
}  
#####  
agent pop_urbana  
#####  
{  
  position: (123, 83)  
  alpha: 250  
  impact: (Centro, 60)  
  count: 1591  
  input Centro  
  {  
    uselayer: Centro  
    member: mp ( 0, 1) ( 25, 0)  
    member: pr ( 0, 0) ( 25, 1) ( 50, 0)  
    member: rp ( 15, 0) ( 50, 1) ( 85, 0)  
    member: pp ( 35, 0) ( 85, 1) (150, 0)  
    member: lg ( 65, 0) (150, 1) (256, 0)  
    member: ml (150, 0) (256, 1)  
  }  
  input Estrada  
  {  
    uselayer: Estrada  
    member: mp ( 0, 1) ( 25, 0)  
    member: pr ( 0, 0) ( 25, 1) ( 50, 0)  
    member: rp ( 15, 0) ( 50, 1) ( 85, 0)  
    member: pp ( 35, 0) ( 85, 1) (150, 0)  
    member: lg ( 65, 0) (150, 1) (256, 0)  
  }  
}
```

```
member: ml (150, 0) (256, 1)
}
output
{
member: terrivel ( 0, 1) ( 50, 0)
member: pessimo ( 0, 0) ( 50, 1) (100, 0)
member: ruim ( 50, 0) (100, 1) (150, 0)
member: regular (100, 0) (150, 1) (200, 0)
member: bom (150, 0) (200, 1) (250, 0)
member: excelente (225, 0) (256, 1)
}
#-----
rules
#-----
{
if ((Centro IS mp) AND (Estrada IS mp)) OUTPUT = excelente
if ((Centro IS mp) AND (Estrada IS pr)) OUTPUT = bom
if ((Centro IS mp) AND (Estrada IS rp)) OUTPUT = regular
if ((Centro IS mp) AND (Estrada IS pp)) OUTPUT = ruim
if ((Centro IS mp) AND (Estrada IS lg)) OUTPUT = pessimo
if ((Centro IS mp) AND (Estrada IS ml)) OUTPUT = terrivel
if ((Centro IS pr) AND (Estrada IS mp)) OUTPUT = bom
if ((Centro IS pr) AND (Estrada IS pr)) OUTPUT = regular
if ((Centro IS pr) AND (Estrada IS rp)) OUTPUT = ruim
if ((Centro IS pr) AND (Estrada IS pp)) OUTPUT = pessimo
if ((Centro IS pr) AND (Estrada IS lg)) OUTPUT = terrivel
if ((Centro IS rp) AND (Estrada IS mp)) OUTPUT = regular
if ((Centro IS rp) AND (Estrada IS pr)) OUTPUT = ruim
if ((Centro IS rp) AND (Estrada IS rp)) OUTPUT = pessimo
if ((Centro IS rp) AND (Estrada IS pp)) OUTPUT = terrivel
if ((Centro IS pp) OR (Estrada IS pp)) OUTPUT = ruim
if ((Centro IS pp) OR (Estrada IS lg)) OUTPUT = pessimo
if ((Centro IS pp) OR (Estrada IS ml)) OUTPUT = terrivel
if ((Centro IS lg) OR (Estrada IS lg)) OUTPUT = pessimo
if ((Centro IS ml) OR (Estrada IS ml)) OUTPUT = terrivel
}
}
#*****
agent pop_rural_1
#*****
{
position: (27, 54)
alpha: 250
impact: (Periferia, 60)
count: 665
input Periferia
{
uselayer: Periferia
member: mp ( 0, 1) ( 25, 0)
member: pr ( 0, 0) ( 25, 1) ( 50, 0)
member: rp ( 15, 0) ( 50, 1) ( 85, 0)
member: pp ( 35, 0) ( 85, 1) (150, 0)
member: lg ( 65, 0) (150, 1) (256, 0)
member: ml (150, 0) (256, 1)
}
input Estrada
{
uselayer: Estrada
member: mp ( 0, 1) ( 25, 0)
member: pr ( 0, 0) ( 25, 1) ( 50, 0)
member: rp ( 15, 0) ( 50, 1) ( 85, 0)
member: pp ( 35, 0) ( 85, 1) (150, 0)
member: lg ( 65, 0) (150, 1) (256, 0)
member: ml (150, 0) (256, 1)
}
}
output
{
member: terrivel ( 0, 1) ( 50, 0)
member: pessimo ( 0, 0) ( 50, 1) (100, 0)
member: ruim ( 50, 0) (100, 1) (150, 0)
member: regular (100, 0) (150, 1) (200, 0)
member: bom (150, 0) (200, 1) (250, 0)
member: excelente (225, 0) (256, 1)
}
}
```

```
#-----  
rules  
#-----  
{  
if ((Periferia IS mp) AND (Estrada IS mp)) OUTPUT = excelente  
if ((Periferia IS mp) AND (Estrada IS pr)) OUTPUT = bom  
if ((Periferia IS mp) AND (Estrada IS rp)) OUTPUT = regular  
if ((Periferia IS mp) AND (Estrada IS pp)) OUTPUT = ruim  
if ((Periferia IS mp) AND (Estrada IS lg)) OUTPUT = pessimo  
if ((Periferia IS mp) AND (Estrada IS ml)) OUTPUT = terrivel  
  
if ((Periferia IS pr) AND (Estrada IS mp)) OUTPUT = bom  
if ((Periferia IS pr) AND (Estrada IS pr)) OUTPUT = regular  
if ((Periferia IS pr) AND (Estrada IS rp)) OUTPUT = ruim  
if ((Periferia IS pr) AND (Estrada IS pp)) OUTPUT = pessimo  
if ((Periferia IS pr) AND (Estrada IS lg)) OUTPUT = terrivel  
  
if ((Periferia IS rp) AND (Estrada IS mp)) OUTPUT = regular  
if ((Periferia IS rp) AND (Estrada IS pr)) OUTPUT = ruim  
if ((Periferia IS rp) AND (Estrada IS rp)) OUTPUT = pessimo  
if ((Periferia IS rp) AND (Estrada IS pp)) OUTPUT = terrivel  
  
if ((Periferia IS pp) OR (Estrada IS pp)) OUTPUT = ruim  
if ((Periferia IS pp) OR (Estrada IS lg)) OUTPUT = pessimo  
if ((Periferia IS pp) OR (Estrada IS ml)) OUTPUT = terrivel  
  
if ((Periferia IS lg) OR (Estrada IS lg)) OUTPUT = pessimo  
if ((Periferia IS ml) OR (Estrada IS ml)) OUTPUT = terrivel  
}  
}  
#*****  
agent pop_rural_2  
#*****  
{  
position: (209, 182)  
alpha: 250  
impact: (Periferia, 60)  
count: 734  
input Periferia  
{  
uselayer: Periferia  
member: mp ( 0, 1) ( 25, 0)  
member: pr ( 0, 0) ( 25, 1) ( 50, 0)  
member: rp ( 15, 0) ( 50, 1) ( 85, 0)  
member: pp ( 35, 0) ( 85, 1) (150, 0)  
member: lg ( 65, 0) (150, 1) (256, 0)  
member: ml (150, 0) (256, 1)  
}  
input Estrada  
{  
uselayer: Estrada  
member: mp ( 0, 1) ( 25, 0)  
member: pr ( 0, 0) ( 25, 1) ( 50, 0)  
member: rp ( 15, 0) ( 50, 1) ( 85, 0)  
member: pp ( 35, 0) ( 85, 1) (150, 0)  
member: lg ( 65, 0) (150, 1) (256, 0)  
member: ml (150, 0) (256, 1)  
}  
output  
{  
member: terrivel ( 0, 1) ( 50, 0)  
member: pessimo ( 0, 0) ( 50, 1) (100, 0)  
member: ruim ( 50, 0) (100, 1) (150, 0)  
member: regular (100, 0) (150, 1) (200, 0)  
member: bom (150, 0) (200, 1) (250, 0)  
member: excelente (225, 0) (256, 1)  
}  
}
```

```
#-----  
rules  
#-----  
{  
if ((Periferia IS mp) AND (Estrada IS mp)) OUTPUT = excelente  
if ((Periferia IS mp) AND (Estrada IS pr)) OUTPUT = bom  
if ((Periferia IS mp) AND (Estrada IS rp)) OUTPUT = regular  
if ((Periferia IS mp) AND (Estrada IS pp)) OUTPUT = ruim  
if ((Periferia IS mp) AND (Estrada IS lg)) OUTPUT = pessimo  
if ((Periferia IS mp) AND (Estrada IS ml)) OUTPUT = terrivel  
if ((Periferia IS pr) AND (Estrada IS mp)) OUTPUT = bom  
if ((Periferia IS pr) AND (Estrada IS pr)) OUTPUT = regular  
if ((Periferia IS pr) AND (Estrada IS rp)) OUTPUT = ruim  
if ((Periferia IS pr) AND (Estrada IS pp)) OUTPUT = pessimo  
if ((Periferia IS pr) AND (Estrada IS lg)) OUTPUT = terrivel  
if ((Periferia IS rp) AND (Estrada IS mp)) OUTPUT = regular  
if ((Periferia IS rp) AND (Estrada IS pr)) OUTPUT = ruim  
if ((Periferia IS rp) AND (Estrada IS rp)) OUTPUT = pessimo  
if ((Periferia IS rp) AND (Estrada IS pp)) OUTPUT = terrivel  
if ((Periferia IS pp) OR (Estrada IS pp)) OUTPUT = ruim  
if ((Periferia IS pp) OR (Estrada IS lg)) OUTPUT = pessimo  
if ((Periferia IS pp) OR (Estrada IS ml)) OUTPUT = terrivel  
if ((Periferia IS lg) OR (Estrada IS lg)) OUTPUT = pessimo  
if ((Periferia IS ml) OR (Estrada IS ml)) OUTPUT = terrivel  
}  
}  
}
```