

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

**Gestão de Recursos Hídricos em Ambientes Urbanos Costeiros:
Modelagem e Representação do Conhecimento em
Sistemas de Informação Geográfica**

Iana Alexandra Alves Rufino

Tese de Doutorado

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE DOUTORADO TEMÁTICO
DOUTORADO EM RECURSOS NATURAIS

Campina Grande
2004

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

R923g Rufino, Iana Alexandra Alves

2004 Gestão de recursos hídricos em ambientes urbanos costeiros: modelagem e representação do conhecimento em sistemas de informação geográfica / Iana Alexandra Alves Rufino. – Campina Grande: UFCG, 2004.
166 f.: il. col.

Inclui Bibliografia

Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Centro de Ciências e Tecnologia,
Universidade Federal de Campina Grande.

1 – Gestão de recursos hídricos 2 – Planejamento Urbano 3 – Geoprocessamento
I - Título

CDU 556.18:711.4

**Gestão de Recursos Hídricos em Ambientes Urbanos Costeiros:
Modelagem e Representação do Conhecimento em
Sistemas de Informação Geográfica**

Iana Alexandra Alves Rufino

Tese apresentada ao Programa Institucional de
Doutorado Temático - Doutorado em Recursos
Naturais da Universidade Federal de Campina
Grande para a obtenção do grau de Doutor.

Orientadores:

**Vajapeyam Srirangachar Srinivasan
e Carlos de Oliveira Galvão**

Campina Grande
2004

Aos meus pais Antão e Joseni...
... e aos homens de minha vida, Neto e Ian.

Agradecimentos

A Deus pela oportunidade, capacidade e disposição para estudar, crendo que “toda boa dádiva e todo dom perfeito vêm do alto, descendo do Pai das luzes, em quem não há mudança nem sombra de variação” (Tiago 1:17)

Ao meu marido, pelo incentivo, apoio, compreensão e paciência em todos os momentos.

Aos meus pais pelo apoio “logístico” durante todo o doutorado e, especialmente, nesta fase final.

À Zélia e à “mainha” por cuidar do meu filho com o carinho e o cuidado necessários para que eu pudesse terminar este doutorado.

A Carlos e Márcia, um misto de orientadores e colegas, pelo exemplo de profissionalismo e, principalmente, pelo interesse e amizade de mais de uma década.

À Capes pelo apoio financeiro em parte da pesquisa.

Aos colegas professores e pesquisadores da UFRN pelo apoio e incentivo.

Aos professores e alunos do programa de Doutorado em Recursos Naturais da UFCG pelas contribuições formais e informais.

Ao “pessoal do bloco BU” (alunos de doutorado, mestrado, iniciação científica, bolsistas de apoio técnico, etc.) pelo carinho, apoio e, principalmente, pelo ambiente de trabalho formidável nestes últimos seis meses.

A Josivan pelo apoio técnico nas simulações com o modelo de fluxo subterrâneo.

A Gerald pela colaboração significativa em sua passagem pelo laboratório.

A Ana Cristina pela parceria e colaboração em algumas fases da pesquisa

Aos professores Patrocínio e Janiro pela disponibilidade em contribuir com seu conhecimento especializado e suas experiências tão ricas.

À Secretaria de Planejamento da Prefeitura Municipal de João Pessoa e em especial à Adriana, Sérgio, Ilka e Tânia pela boa vontade e disponibilidade em colaborar em todos os momentos.

A todos os demais órgãos e instituições (SEMARH, CAGEPA, LRH/CT/UFPB) pelo apoio e pelos dados disponibilizados.

Enfim, a todos os parentes e amigos pelas orações, pela torcida e pelas palavras de incentivo em todo o tempo.

Resumo

A modelagem e a representação do conhecimento em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são abordadas neste trabalho sob a perspectiva do apoio à decisão em gestão de recursos hídricos em ambientes costeiros. Neste sentido, realiza-se uma observação sistemática de uma equipe de gestão no que tange à condução de processos decisórios em uma área urbana costeira escolhida como estudo de caso. Os processos decisórios modelados consideram as inter-relações entre água e planejamento urbano visando minimizar os impactos sociais, econômicos e ambientais possíveis de ocorrer quando os problemas urbanos diretamente relacionados com os recursos hídricos não são considerados em um contexto de planejamento. O processo de tomada de decisão é consolidado e convertido em planos de informação através de análises e inferências espaciais de um Sistema de Informação Geográfica. O SIG, considerado nesta pesquisa como um Sistema de Apoio à Decisão Espacial, é a ferramenta de gerenciamento das informações, é um instrumento de apoio na estimativa de dados incompletos e/ou ausentes baseado no conhecimento acumulado dos especialistas consultados, além de ser o ambiente de disponibilização e visualização das informações para a equipe de gestão. Além disso, as interações possíveis entre a equipe de gestão e o ferramental disponível são observadas partindo do princípio de que as decisões a serem tomadas podem ser melhor apoiadas com um sistema deste tipo. Os recursos de análise e inferência espacial do Sistema de Informação Geográfica são explorados de forma a ampliar a capacidade de suporte à decisão destes sistemas e, ao término da implementação, são obtidas diretrizes técnicas para a gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas, além de diretrizes urbanísticas para a ocupação da área escolhida.

Abstract

The modeling and knowledge representation in Geographic Information Systems (GIS) are approached in this work under a decision support perspective in water resources management of coastal environments. In this scenario, a systematic observation about a management team takes place in the conduction of decision making processes in a coastal urban area chosen as object of study. The modeled decision making processes consider the interrelations between water and urban planning in order to minimize social, economical and environmental impacts possible of happening when urban problems directly related with water resources are not considered in a planning context. The decision making process is consolidated and turned into spatial layers of information through spatial analyses and inferences of a Geographic Information System. The GIS, considered in this research as a Spatial Decision Support System, is the information management tool and it's a support instrument for estimating missing or incomplete data based on accumulated knowledge from consulted specialists, besides being a n disposal and a visual environment of information to management team. Besides, the possible interactions between the management team and the available tools are observed from the point that the decision making can be better supported with a system alike this one. The analysis resources and spatial inferences of the Geographic Information System are explored in order to enlarge the decision support capacity of these systems and, at the end of the running stage, technical guidelines are obtained to integrated management of superficial and underground waters, besides urban guidelines for land use in the chosen area.

Sumário

Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
<hr/>	
Capítulo 1 - Introdução	14
1.1. Apresentação	14
1.2. Objetivos	15
1.3. Estrutura Geral da Tese	15
<hr/>	
Capítulo 2 - Fundamentação Teórica	17
2.1. Sistemas de Apoio à Decisão e Processos Decisórios	17
2.2. Sistemas de Suporte à Decisão Espaciais	20
2.3. Modelagem e Representação de Processos Decisórios em Sistemas de Informação Geográfica	24
2.3.1. Funções do SIG	25
2.3.2. O SIG como SAD	30
2.3.3. Gerenciamento do Conhecimento	32
2.3.4. Inferências Espaciais e Apoio à Decisão	34
2.4. Processos Decisórios em Recursos Hídricos	39
2.4.1. Espacialidade das Informações	40
2.4.2. Incerteza e Ausência das Informações	41
2.5. Áreas Costeiras Urbanizadas	44
2.5.1. Decisões de Gestão	44
2.5.2. Gestão Integrada: Águas Superficiais e Subterrâneas	45
<hr/>	
Capítulo 3 - Abordagem Metodológica	47
3.1. Considerações Iniciais	47
3.2. Etapas Metodológicas	48
3.3. Aquisição do Conhecimento	49
3.3.1. Levantamento dos Dados Existentes	49
3.3.2. Aquisição do Conhecimento Especializado	50
3.4. Sistematização do Processo Decisório	51
3.5. Modelagem Conceitual	53
3.6. Modelagem Espacial	54
3.6.1. Pré-processamento	55
3.6.2. Desenvolvimento do Modelo	55
3.6.3. Implementação	57
<hr/>	
Capítulo 4 - Estudo de Caso	59
4.1. Ambientes Costeiros: Considerações Gerais	59
4.2. Áreas Costeiras na Cidade de João Pessoa	60
4.2.1. Localização e Aspectos Físicos	60
4.2.2. Hidrogeologia	62

4.3. Água e Planejamento Urbano no Bairro do Bessa	64
4.3.1. Expansão Urbana	67
4.3.2. Alagamentos: Problemas Frequentes	69
4.3.3. Drenagem Superficial e Águas Subterrâneas	74
4.3.4. Aspectos Legais da Gestão	76
4.4. Sistema de Apoio à Decisão Espacial: uma Alternativa para a Gestão	81
4.4.1. Aquisição do Conhecimento	83
4.4.2. Sistematização do Processo Decisório	87
4.4.3. Modelagem Conceitual	89
4.4.4. Modelagem Espacial	92
<hr/>	
Capítulo 5 - Resultados: Análises e Discussões	118
5.1. Alternativa “A”: Susceptibilidade a Alagamentos	118
5.2. Alternativa “B”: Rebaixamento do Lençol	130
5.3. Alternativa “C”: Bom Funcionamento dos Canais	142
5.4. Alternativa “D”: Garantia de Áreas Mínimas de Recarga	144
5.5. Escolha entre Alternativas: Possibilidades	149
<hr/>	
Capítulo 6 - Conclusões	151
6.1. Representação de Conhecimento em SIG	152
6.2. Água e Planejamento Urbano	154
6.3. Diretrizes para a Gestão no Bairro do Bessa	155
<hr/>	
Referências Bibliográficas	157
<hr/>	
Bibliografia Adicional Consultada	164

Lista de Figuras

Figura 1	As três fases do processo de tomada de decisão segundo Simon, (1960).	18
Figura 2	O processo decisório em um SSD (adaptado de Shim et al, 2002).	19
Figura 3	Exemplo de reclassificação em um mapa de altimetria (Malczewski, 1999).	27
Figura 4	Exemplo de uma operação de multiplicação em um tema raster (Malczewski, 1999).	27
Figura 5	Operações de conectividade-Polígonos de Thiessen (Malczewski, 1999).	28
Figura 6	SIG nas três fases do processo decisório (adaptado de Malczewski, 1999).	31
Figura 7	Diagrama de Venn mostrando os resultados da aplicação de operadores de lógica <i>booleana</i> para dois ou mais conjuntos (Burrough & McDonnell, 1998).	37
Figura 8	Diagrama de Venn ilustrando a diferença de fronteira entre um conjunto fuzzy (A) e um conjunto booleano (B) (Burrough, 1998).	39
Figura 9	Grau de estruturação de um problema decisório (baseado em Malczewski, 1997)	51
Figura 10	Representação esquemática de uma informação gerada em um SIG (adaptado de Burrough, 1996).	54
Figura 11	Exemplo de modelagem conceitual (ou cartográfica) para a obtenção de mapa de áreas permeáveis em uma área urbana.	56
Figura 12	Exemplo da implementação (simplificado) da modelagem espacial da figura 11.	58
Figura 13	Brasil: Mapa de compartimentação do relevo (IBGE, 2002)	60
Figura 14	Localização da cidade de João Pessoa.	61
Figura 15	Modelo digital de Elevação da cidade de João Pessoa – PB (gerado a partir dos pontos cotados cedidos pela SEPLAN).	62
Figura 16	Mapa geológico da Grande João Pessoa (adaptado de CPRM, 2002)	63
Figura 17	Limite municipal de João Pessoa, localização do bairro do Bessa e principais cursos d'água (elaborado a partir de SEPLAN, 2000).	65
Figura 18	Antigo bairro do Bessa (hoje: Bessa, Aeroclube, Jardim Oceania) e bairros adjacentes (composição colorida RGB das bandas 5,4,e 3. Imagem do dia 04/08/2001, sensor TM, satélite Landsat5)	66
Figura 19	Evolução urbana e vetores de crescimento na cidade de João Pessoa. Localização da área de estudo. (adaptado de Silveira, 2001)	67
Figura 20	Mosaico de ortofotos do bairro do Bessa no início de sua expansão urbana (ano do levantamento aerofotogramétrico: 1976).	70
Figura 21	Mosaico de ortofotos do bairro do Bessa com urbanização em fase de consolidação (ano do levantamento aerofotogramétrico: 1998).	71
Figura 22	Represamento da drenagem natural pela implantação da rede viária. Junho/2000. Rua Ivanice M. Câmara/ Rua Lindolfo José C. Neves. Bessa. (Nóbrega, 2002).	72
Figura 23	Trechos de rio canalizados no bairro do Bessa (Nóbrega, 2002).	73
Figura 24	Canais de macro-drenagem no bairro do Bessa	74

Figura 25	Alagamentos recentes na área de estudo (julho/2004).	82
Figura 26	Convenções utilizadas nos fluxogramas.	95
Figura 27	Alternativa A: Modelagem espacial do item A.1.	96
Figura 28	Alternativa A: modelagem espacial do item A.1(cont.).	97
Figura 29	Alternativa A: modelagem espacial do item A.2.	97
Figura 30	Alternativa A: modelagem espacial do item A.3.	98
Figura 31	Alternativa A: modelagem espacial do item A.4 (conclusão da alternativa).	99
Figura 32	Alternativa B: modelagem espacial do item B.1.	100
Figura 33	Alternativa B: modelagem espacial do item B.1 (cont.).	101
Figura 34	Alternativa B: modelagem espacial do item B.2.	101
Figura 35	Alternativa B: modelagem espacial dos itens B.3 e B.4.	102
Figura 36	Alternativa B: resultados esperados após simulação no modelo de fluxo subterrâneo.	103
Figura 37	Alternativa B: Simulação de vazões diferenciadas e verificação de intrusão salina.	104
Figura 38	Alternativa C: modelagem espacial do item C.1.	104
Figura 39	Alternativa C: modelagem espacial dos itens C.2 e C.3.	105
Figura 40	Alternativa D: modelagem espacial do item D.1.	105
Figura 41	Alternativa D: modelagem espacial do item D.2.	106
Figura 42	Alternativa D: modelagem espacial do item D.3.	107
Figura 43	Escolha entre alternativas.	108
Figura 44	Distribuição espacial dos piezômetros instalados e isolinhas potenciais observadas em maio de 1999.	112
Figura 45	Níveis piezométricos (Maio de 1999) e Modelo Numérico do Terreno.	112
Figura 46	Mapa de profundidade do aquífero freático do bairro do Bessa	113
Figura 47	Mapa de declividades do bairro do Bessa.	114
Figura 48	Mapa de distâncias aos corpos hídricos no bairro do Bessa.	115
Figura 49	Uso do solo no bairro do Bessa (elaborado a partir de SEPLAN, 2000).	116
Figura 50	Vias de acesso e permeabilidade do Bairro do Bessa.	116
Figura 51	Áreas de preservação permanente (Plano Diretor).	117
Figura 52	Lotes ocupados em vias não pavimentadas do bairro do Bessa	118
Figura 53	Função linear monotonicamente decrescente para o critério “profundidade” (Alternativa A, item A.1).	119
Figura 54	Função Linear monotonicamente decrescente para o critério “declividades” (Alternativa A, item A.1).	120
Figura 55	Mapas de profundidade e declividade reclassificados para o intervalo de 0 a 100, segundo uma função linear monotonicamente decrescente.	120
Figura 56	Função linear monotonicamente crescente para o critério “distância aos corpos hídricos” (Alternativa A, item A.1).	121

Figura 57	Mapa de distâncias aos corpos hídricos reclassificado para o intervalo de 0 a 100, segundo uma função linear monotonicamente decrescente.	121
Figura 58	Lotes ocupados com maior risco de alagamento (Alternativa A, item A.1).	122
Figura 59	Áreas com cotas de profundidade menores que 3 (três) metros e lotes considerados “ilhados”.	123
Figura 60	Restrições de ocupação previstas em Lei (Alternativa A, item A.3).	124
Figura 61	Mapas de distâncias às vias de acesso e mapa de distâncias aos lotes ocupados com maior susceptibilidade a alagamentos.	124
Figura 62	Função linear monotonicamente crescente para o critério “distância aos lotes ocupados com maior risco de alagamento” (Alternativa A, item A.4).	125
Figura 63	Função linear monotonicamente decrescente para o critério “distância a vias pavimentadas (Alternativa A, item A.4).	125
Figura 64	Função linear monotonicamente crescente para o critério “profundidade” (Alternativa A, item A.4).	126
Figura 65	Função linear monotonicamente crescente para o critério “declividade” (Alternativa A, item A.4).	126
Figura 66	Função linear monotonicamente decrescente para o critério “distância aos corpos hídricos” (Alternativa A, item A.4).	126
Figura 67	Mapas de distâncias reclassificados para o intervalo de 0 a 100, segundo uma função linear monotonicamente <i>crescente</i> para os lotes potencialmente alagáveis e <i>decrescente</i> para as vias de acesso.	127
Figura 68	Mapas de profundidade e declividade reclassificados para o intervalo de 0 a 100, segundo uma função linear monotonicamente crescente.	127
Figura 69	Mapas de distância aos corpos hídricos reclassificado para o intervalo de 0 a 100, segundo uma função linear monotonicamente crescente.	128
Figura 70	Melhores áreas para ocupação. Lotes vazios sobrepostos às melhores áreas. (resultado da análise multicriterial espacial).	129
Figura 71	Respostas às consultas para simular localizações de poços	131
Figura 72	Simulações de afloramento do lençol para recargas homogêneas de 100, 200, 300 e 400 mm, respectivamente.	133
Figura 73	Localizações sugeridas pela modelagem espacial para ativação/implantação de poços no bairro do Bessa	134
Figura 74	Distribuição Espacial dos parâmetros hidráulicos (Condutividade Hidráulica e Porozidade efetiva) utilizados na calibração do modelo para a área do Bessa.	135
Figura 75	Rebaixamentos (em metros) obtidos para um bombeamento de 10m ³ /dia em todos os poços simulados.	136
Figura 76	Rebaixamentos (em metros) obtidos para um bombeamento de 20m ³ /dia em pontos de afloramento e praças e de 10m ³ /dia nas demais localizações.	137
Figura 77	Rebaixamentos (em metros) obtidos para um bombeamento de 20 m ³ /dia em pontos de afloramento e praças e, de 10 m ³ /dia nas demais localizações.	138
Figura 78	Intrusão salina verificada após simulação de bombeamento.	139
Figura 79	Localizações de poços sugeridas que foram retiradas da análise e mapa de direção de fluxo obtido após nova simulação.	140

Figura 80	Níveis piezométricos limite após rebaixamento (15/06/99 a 15/07/99).	141
Figura 81	Alternativa C: bombeamento nas proximidades dos canais	142
Figura 82	Verificação da intrusão salina no cenário de bombeamento próximo aos canais.	143
Figura 83	Maceió do Clube dos Médicos (Nóbrega, 2002)	143
Figura 84	Mapa de profundidade do aquífero após rebaixamento.	144
Figura 85	Função linear monotonicamente decrescente para o critério “declividades”.	145
Figura 86	Função linear monotonicamente decrescente para o critério “profundidade”.	145
Figura 87	Função constante para o critério “precipitação”.	145
Figura 88	Critérios de adequação padronizados.	146
Figura 89	Melhores áreas para recarga.	147
Figura 90	Distância às residências, distâncias às praças e áreas dos lotes vazios	147
Figura 91	Função linear monotonicamente decrescente para o critério “distância a residências”.	148
Figura 92	Função linear monotonicamente crescente para o critério “distância a praças”.	148
Figura 93	Função linear monotonicamente crescente para o critério “áreas dos lotes vazios”.	148
Figura 94	Lotes recomendados para a implantação de praças (áreas verdes) no bairro.	149

Lista de Tabelas

Tabela 1: Tecnologias relacionadas com SIG (adaptado de Malczewski, 2003).	22
Tabela 2: Questões de Gerenciamento do Conhecimento (GC) em SIG (adaptado de West & Hess, 2002).	32
Tabela 3: Teoria Geográfica e Geoprocessamento (CÂMARA et al, 2002).	33
Tabela 4: “Habite-se” liberados na área de restinga pertencente ao município de João Pessoa (adaptado de Rocha, 1996).	68
Tabela 5: Cotas da superfície piezométrica do aquífero obtidas pela ATECEL/UFPB (1999) durante a <i>primeira</i> campanha de medição (Marques, 2004).	109
Tabela 6: Cotas da superfície piezométrica do aquífero, obtidas pela ATECEL/UFPB (1999) na <i>segunda</i> campanha de medição (Marques, 2004).	110

Capítulo 1

Introdução

1.1. Apresentação

Os diversos aspectos que permeiam o planejamento e a gestão de recursos hídricos apresentam um caráter multidisciplinar, haja vista a grande quantidade de conhecimentos envolvidos nas áreas sócio-econômicas e tecnológicas. No que diz respeito às áreas urbanas este enfoque multidisciplinar tem sido ainda mais importante para uma solução adequada dos problemas ligados à água. O cerne do problema está em como tomar as melhores decisões (as mais acertadas, mais bem apoiadas, etc) em um campo que se caracteriza por: complexidade, incertezas de diversas naturezas, conflitos, investimentos de grande porte, necessidade de planejamento a longo prazo, dinamismo ao longo da vida útil, repercussões econômicas, sociais e ambientais significativas, e participação de grupos heterogêneos no processo decisório.

Em áreas urbanas, a gestão integrada de águas subterrâneas e superficiais aliada à heterogeneidade, aos conflitos de objetivos, à alta carga de subjetividade e, muitas vezes, à *ausência* de alguma informação necessária, implicam, muitas vezes, em um número grande de decisões a serem tomadas, o que tem tornado clara a necessidade de se dispor de ferramentas de caráter integrador que facilitem esta tomada de decisões.

Nesse sentido, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), com seus recursos de gerenciamento e visualização das informações, de análises e inferências espaciais, podem ser utilizados como Sistemas de Suporte à Decisão Espaciais (SDSS, do inglês: Spatial Decision Support Systems) para apoio à gestão, auxiliando em todas as fases de um processo decisório, inclusive, podendo ser utilizado na estimativa de dados incompletos e/ou ausentes. Embora seja uma ferramenta eficiente, a modelagem do conhecimento especializado na base de dados de um SIG não é uma tarefa simples pois, o processo decisório em um problema de gestão de recursos hídricos não é estático e, muitas vezes, é de difícil representação. Qualquer tentativa de representar este processo requer uma simplificação de procedimentos e interações que pode privilegiar alguns aspectos em detrimento de outros.

Este trabalho aborda a representação de conhecimento especializado na base de dados de um SIG e sua utilização como SDSS, utilizando para tanto a observação sistemática da forma de condução dos processos de análise e tomada de decisão de uma equipe formada por especialistas e técnicos para a gestão de recursos hídricos em uma área urbana que apresenta problemas de gestão de recursos hídricos, os quais, demandam tomadas de decisão que podem ser modeladas e apoiadas pelo SIG.

1.2. Objetivos

- Modelar e representar processos decisórios relativos à gestão de recursos hídricos em ambientes urbanos, fazendo uso de um Sistema de Informação Geográfica no gerenciamento das informações, na estimativa de dados incompletos e/ou ausentes e na análise e inferência espacial para apoio à gestão;

- Contribuir para a ampliação da capacidade de suporte à decisão de um SIG, enfocando sua utilização como Sistema de Suporte a Decisão Espacial (SSDE), explorando, principalmente, as possibilidades de representação e modelagem de conhecimento especializado neste ambiente;

- Promover uma maior integração entre a gestão urbana e a gestão de recursos hídricos ao considerar, na modelagem dos processos decisórios, as inter-relações entre água e planejamento urbano visando minimizar os impactos sociais, econômicos e ambientais possíveis de ocorrer quando os problemas urbanos diretamente relacionados com os recursos hídricos não são considerados em um contexto de planejamento;

- Para o caso estudado, obter diretrizes técnicas para a gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas, além de diretrizes urbanísticas para a ocupação da área escolhida.

1.3. Estrutura Geral da Tese

No capítulo 2 desta tese é apresentada toda a fundamentação teórica pertinente à pesquisa, de forma a esclarecer termos e definições relevantes, bem como contextualizar este trabalho ante a literatura científica das diversas áreas de conhecimento a ele relacionadas, a saber: Sistemas de Apoio à Decisão Espaciais, Sistemas de Informação Geográfica, Representação do Conhecimento em Sistemas de Informação Geográfica, Processos Decisórios em Recursos Hídricos, Planejamento Urbano e Recursos Hídricos, Gestão de Recursos Hídricos em Áreas Urbanas Costeiras e Gestão Integrada de Águas Superficiais e Subterrâneas. A interdisciplinaridade desta pesquisa pode ser percebida não só neste capítulo como em todo o desenvolvimento do trabalho.

O capítulo 3 trata da metodologia desenvolvida para a consecução da pesquisa descrevendo a aquisição dos dados, estruturação e modelagem dos processos decisórios no ambiente computacional de um sistema de informação geográfica. Toda a modelagem conceitual do sistema é apresentada e o enfoque principal está na representação do conhecimento dos especialistas entrevistados em planos de informações espaciais e de como as alternativas de gestão dos recursos hídricos em áreas urbanas podem ser geradas e escolhidas neste ambiente.

O capítulo 4 apresenta o caso estudado, caracterizando inicialmente a fração urbana escolhida e aplicando nesta porção do território a metodologia apresentada no capítulo anterior. Na caracterização são enfocados os problemas de gestão de recursos hídricos comuns a este tipo de área, além de serem identificadas, de forma geral, as possíveis decisões de gestão dos órgãos de planejamento responsáveis. São considerados também, aspectos físicos, hidrológicos, históricos, econômicos, sociais e legais, de forma a permitir um conhecimento aprofundado dos problemas a serem dirimidos pela aplicação da metodologia. Em seguida são observados e representados processos de tomada de decisão conduzidos por uma equipe de gestão, na área estudada. Estes processos são consolidados e representados por planos de informação espaciais de forma a compor a base de conhecimento de um Sistema de Suporte à Decisão Espacial.

Os resultados obtidos são apresentados, analisados e discutidos no capítulo 5, bem como a partir destes resultados são realizadas algumas prospecções acerca do tema da pesquisa como um todo. O capítulo 6 apresenta as conclusões finais do trabalho diante dos objetivos a que se propôs a pesquisa e, por fim, é apresentada a bibliografia consultada e referenciada neste documento.

2.1. Sistemas de Apoio à Decisão e Processos Decisórios

“Nada é mais difícil, e por isso mais precioso, do que ser capaz de decidir”

(Napoleão)

Os Sistemas de Suporte a Decisões (SSD) ou Sistemas de Apoio à Decisão (SAD) têm se destacado nos últimos anos, como ferramentas baseadas na utilização intensiva de bases de dados e modelos simplificados da realidade (matemáticos, conceituais ou heurísticos). Estes sistemas têm avançado na interface facilitada entre usuário e computador e têm sido aplicados a diversos tipos de atividade humana em que a tomada de decisão é um problema complexo (Sprague & Carlson, 1982; Klein & Methle, 1990; Sage, 1991; Sprague & Watson, 1996).

As principais conseqüências da utilização crescente de SSD nos últimos anos foram (Carlsson & Turban, 2002):

(i) Os tomadores de decisão puderam, de uma forma mais efetiva que anteriormente, lidar com problemas desestruturados ou semi-estruturados, problemas estes, de alto grau de dificuldade, que até então requeriam uma vasta experiência e conhecimento especializado para sua solução;

(ii) Os tomadores de decisão puderam tomar decisões melhores e mais racionais mesmo sem a utilização de ferramentas de otimização e sem a necessidade de conhecimentos avançados de técnicas de modelagem;

(iii) Os tomadores de decisão deram início ao uso sistemático de seu conhecimento e puderam experimentar processos decisórios interativos.

Estes sistemas, entretanto, foram concebidos para *apoiar ou dar suporte* à tomada de decisão que, em última instância, sempre será um ato humano. Desta forma, torna-se fundamental o conhecimento do processo decisório, ou seja, de como o ser humano (seja ele um especialista em qualquer que seja a área), percebe e reage diante das informações que são a ele disponibilizadas para a tomada de decisão. Como ele trata as inconsistências e incertezas neste processo? Como visualiza as informações ou quais as suas preferências de visualização e organização da informação que o ajudam inconscientemente (ou conscientemente) a chegar a uma decisão?

O processo decisório em qualquer atividade humana não é algo simples de ser representado. Dentre os conceitos encontrados na literatura a este respeito, um dos mais difundidos e aceitos é a descrição de Simon (1960) que sugere que qualquer processo de tomada de decisão pode ser estruturado em três grandes fases (Figura 1): *Inteligência* (Há um problema ou uma oportunidade para uma mudança?), *Projeto* (Quais as alternativas?) e *Escolha* (das alternativas existentes, qual é a melhor?).

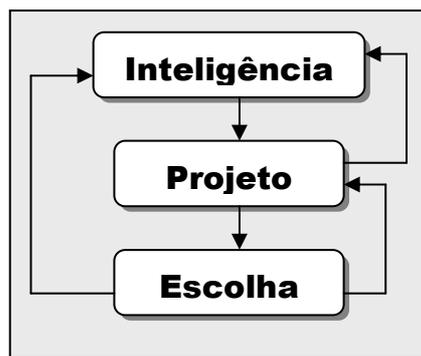


Figura 1 – As três fases do processo de tomada de decisão segundo Simon, (1960).

Estas fases (inteligência-projeto-escolha), porém, nem sempre ocorrem exatamente nesta seqüência em uma tomada de decisão real. Porto e Azevedo (1997) observam que a capacidade de inteligência humana de pensar globalmente, de intuir, de agregar conhecimentos e experiências passadas faz com que o modelo de Simon não seja obedecido exatamente na seqüência proposta. É quase impossível ao ser humano concentrar-se só na fase de inteligência, sem ao menos preliminarmente antecipar o modelo de solução do problema. Ao dar por terminada a fase de inteligência e passar para a fase de projeto é possível que se adquiram novas percepções do problema e se retorne à fase anterior. Este processo de “antecipação e retorno” pode se dar ao longo das três fases do processo e se, por um lado, pode tornar a procura mais longa e trabalhosa, provavelmente levará a resultados de melhor qualidade porque propicia melhor conhecimento do sistema.

A Figura 2 descreve o que provavelmente venha a ser um exemplo mais comum de um processo decisório em um ambiente de um SSD. A ênfase nos sistemas atuais está no desenvolvimento de um padrão/modelo de decisão e na análise do problema. Uma vez que o problema é identificado ele deve ser subdividido e explorado ao máximo de forma a facilitar a criação de modelos. As alternativas de solução são assim geradas e os modelos para analisar as várias alternativas são desenvolvidos. A escolha é então feita e implementada como na descrição de Simon. É claro, que a maioria dos processos decisórios apresentam situações completamente desestruturadas e que, nem sempre essa descrição em fases é fácil de ser obtida. Muito comumente

as diversas fases envolvidas ocorrem simultaneamente ou se repetem ao longo do processo decisório, demandando o retorno a estágios iniciais tanto mais ocorre o aprofundamento sobre o problema, ou sejam identificadas falhas nas alternativas de solução, etc. (Shim et al., 2002).

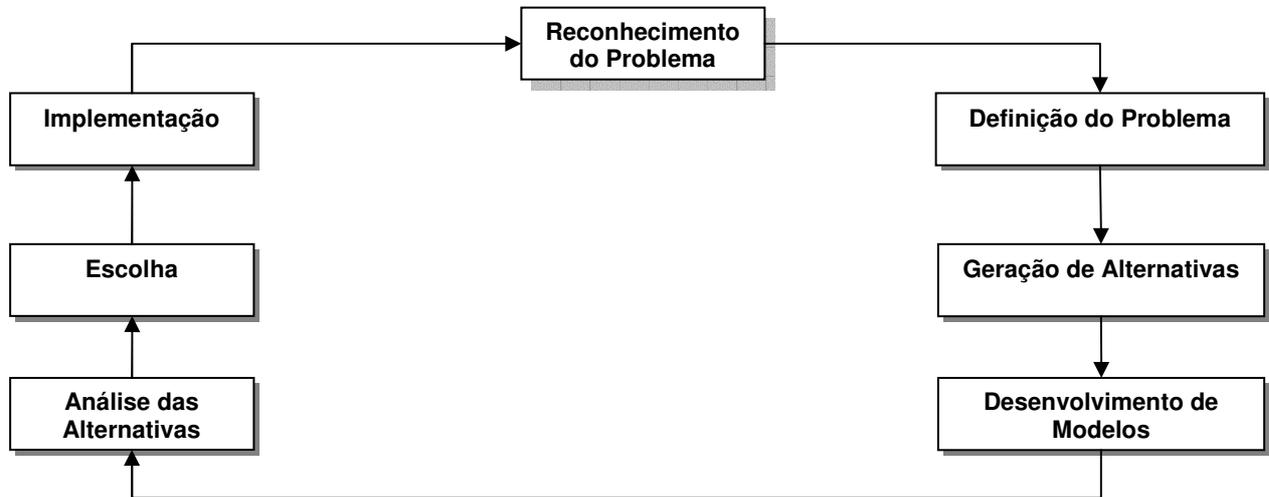


Figura 2 – O processo decisório em um SSD (adaptado de Shim et al., 2002).

Para a próxima década, as pesquisas em SSD apontam algumas tendências (Carlsson & Turban, 2002; Shim et al., 2002):

- (i) Desenvolvimento de ferramentas para tratamento de dados incertos e/ou incompletos e conversão dos mesmos em informação/conhecimento utilizável;
- (ii) Aumento da capacidade de prospecção na tomada de decisão através do uso de métodos e sistemas inteligentes;
- (iii) Exploração de ferramentas computacionais avançadas que melhorem a produtividade e reduzam o tempo para a tomada de decisão;
- (iv) Os pesquisadores e desenvolvedores de SSD deverão centralizar esforços no conhecimento para a tomada da decisão. Este processo será auxiliado pelos contínuos avanços nas ferramentas de suporte a Web, protocolos wireless e sistemas colaborativos de suporte à decisão, os quais serão os maiores responsáveis pela expansão da interatividade e disseminação das tecnologias de apoio à decisão;

2.2. Sistemas de Suporte à Decisão Espaciais

“A memória olha para o passado. A nova consciência olha para o futuro. O espaço é um dado fundamental nesta descoberta.”

(Milton Santos)

Algumas vezes, o problema a ser solucionado exige uma decisão que depende diretamente das características espaciais das informações envolvidas. Em outros momentos, a decisão a ser tomada é por si só um *dado espacial* como, por exemplo, uma localização espacial mais adequada/mais apropriada para a instalação de um certo equipamento, ou de uma grande obra. Nesse contexto, pode-se denominar o sistema de apoio à decisão de “Espacial” e os problemas a serem solucionados por sistemas deste tipo podem apresentar características diferenciadas tais como descreve Malczewski (1997):

- * Um grande número de alternativas de decisão;
- * O resultado ou consequência das alternativas de decisão são sempre **variáveis espaciais**;
- * Cada alternativa é avaliada com base em múltiplos critérios;
- * Alguns destes critérios podem ser quantitativos, outros qualitativos;
- * Há normalmente mais de um tomador de decisão (ou grupo de interesse) envolvidos no processo decisório;
- * Os tomadores de decisão apresentam preferências diferenciadas com respeito à importância relativa de cada critério e às consequências das decisões;
- * As decisões são frequentemente cercadas de incertezas das mais diversas fontes;

As pesquisas em Sistemas de Suporte à Decisão **Espaciais** (do Inglês: SDSS – Spatial Decision Support Systems) se desenvolveram paralelamente ao advento dos Sistemas de Suporte à Decisão (DSS). Os SDSS estão historicamente associados à necessidade de ampliação dos recursos dos GIS (Geographical Information Systems) na solução de problemas espaciais de decisão, problemas estes, complexos e não estruturados (Densham & Goodchild, 1989) e no decorrer da última década podem ser observados avanços consideráveis nas pesquisas sobre o desenvolvimento e aplicações destes sistemas (Clarke, 1990; NCGIA 1990; 1996; Maniezzo, 1998; Grabaum & Meyer, 1998).

Inicialmente, o SIG era considerado como parte integrante de um SDSS, devido à ausência nestes sistemas de funções avançadas de modelagem, otimização, simulação, etc. (Densham, 1990). Nessa abordagem, um SDSS deveria apresentar: 1. Capacidades analíticas de modelos; 2 Capacidade de gerenciamento de Banco de Dados; 3. Recursos de visualização gráfica/espacial; 4. Recursos de geração de dados tabulares e relatórios; 5. Conhecimento especializado do tomador (ou tomadores)

de decisão. Segundo este autor um SIG normalmente apresentava os recursos 2, 3 e 4, e ao agregar a um SIG os recursos 1 e 5 era obtido então um SDSS.

Ao longo dos últimos dez anos, os sistemas de informação geográfica adquiriram maior potencial de apoio à decisão e alguns autores utilizam comumente o termo “GIS-based SDSS”, para os sistemas de suporte à decisão espaciais baseados em SIG ou desenvolvidos em ambiente SIG (Jankowski et al., 1997; Zerger & Smith, 2003). Além disso, em uma perspectiva futura, um SIG deve suportar ambientes colaborativos de SDSSs nos quais seja possível planejar, executar e comparar resultados de modelagens, especialmente quando os tomadores de decisão estiverem em localizações geográficas distintas (Kingston et al., 2000; Kelly & Tuxen, 2003). Vale salientar que o “Web-based GIS” ou o “SIG colaborativo” já é uma realidade, e o principal objetivo das pesquisas nesse sentido tem sido oferecer um ambiente colaborativo para problemas com variáveis de decisão espaciais (Rinner, 2003; Rinner & Malczewski, 2003).

A aptidão do SIG de simular e inter-relacionar *eventos de natureza intrinsecamente espacial*, permite a projeção de cenários para planejamento, bem como a modelagem de funções de correlação e a interação de dados de monitoramento para efeito de controle, supervisão e obtenção de diagnósticos. Entretanto, as definições de SIG como “um conjunto de ferramentas de entrada, armazenamento, consulta, manipulação e análise de dados espaciais” (Burrough, 1986; Maguire, 1991; Teixeira et al., 1992; Silva, 1999; etc.) apesar de corretas, minimizam a grande capacidade de solucionar problemas de um sistema deste gênero. As funções de um SIG podem ter papel fundamental em um processo de tomada de decisão. Foote & Lynch (1996) fazem as seguintes observações sobre as definições de SIG mais utilizadas:

* Um SIG pode ser considerado um sistema que possui um banco de dados digitais para fins específicos. Estes sistemas são relacionados a outras aplicações de banco de dados, mas com uma diferença importante: *toda a informação em um SIG é vinculada a um sistema de referência espacial*. Outras bases de dados podem conter informação locacional (como endereços de rua ou códigos de endereçamento postal), mas uma base de dados de SIG usa georeferências como o meio primário de armazenar e acessar a informação.

* Este tipo de sistema é uma tecnologia integradora (Tabela 1). Entretanto, enquanto outras tecnologias só poderiam ser usadas para analisar fotografias aéreas e imagens de satélite, para criar modelos estatísticos ou para traçar mapas, todas estas capacidades são oferecidas conjuntamente no SIG. Em um SIG é possível observar técnicas de Sensoriamento Remoto (RS – Remote Sensing), Sistemas de Posicionamento Global (GPS – Global Position System), Desenho Assistido por Computador (CAD – Computer Aided Design), Mapeamento Automático e Gerenciamento de Serviços (AM/FM – Automated Mapping e Facilities Management), etc.

* O conjunto de funções de um SIG, deveria ser visto como um *processo* ao invés de simplesmente como software e hardware. SIG's são sistemas de apoio à decisão. O modo no qual os dados são inseridos, armazenados e analisados dentro de um SIG deve refletir a maneira pela qual a informação será usada para uma pesquisa específica ou tarefa de tomada de decisão. Ver o SIG como somente um software ou sistema de hardware é perder de vista o papel crucial que ele pode desempenhar em um processo amplo de tomada de decisão.

Tabela1:

Tecnologias relacionadas com SIG (adaptado de Malczewski, 2003)

Tecnologias	Papel das tecnologias no aumento dos recursos do SIG
Sistemas Gerenciadores de Bancos de Dados (Data Base Management System - DBMS)	Armazena atributos para visualização no SIG Consulta, armazenamento, recuperação, junção, atualização e manutenção de dados, relacionamentos entre campos e entre tabelas
Desenho e Projeto assistido por Computador (Computer Aided Design - CAD)	Estendem os recursos 2D do SIG para 3D Habilitam recursos de renderização (aplicação de texturas) apropriada
Sistemas de Informação do Solo (Land Information Systems - LIS)	Ampliam a capacidade do SIG de levantamento e registro de terra em geral para planejamento e desenvolvimento nas áreas legal e administrativa
Mapeamento Automático e Gerenc. de Serviços (Automated Mapping/Facilities Mapping - AM/FM)	Melhoram as funções do SIG através de recursos de automação e manutenção de mapeamentos para serviços públicos de infra-estrutura como água e esgoto, telefonia, eletricidade e gás.
Sistemas de Posicionamento Global (Global Position Systems – GPS)	Melhora a precisão de localização dos objetos e auxilia na verificação de precisão de alguns atributos no SIG
Sensoriamento Remoto e Aerofotogrametria	Integra SIG e Processamento e Análise Digital de Imagens. Fonte de dados de entrada raster para o SIG.
Pacotes Computacionais Estatísticos (Statistical Software - SS)	Integra SIG e procedimentos estatísticos
Sistemas de Apoio à Decisão Espaciais (Spatial Decision Support Systems - SDSS)	Estende as funções de SIG para apoio à Decisão
Sistemas Especialistas Espaciais (Spatial Expert Systems - SES)	Integra conhecimento de especialistas e SIG
Sistemas de Planejamento Espaciais (Planning Spatial Systems - PSS)	Estende as funções de SIG para Planejamento
Sistemas Multimídia (Multimedia Systems - MS)	Aumenta os recursos de visualização da informação geográfica pelo uso de sons, vídeo, imagens, hipertextos e hot links
Sistemas da Internet (Internet-Based Systems - IS)	Amplia os recursos de disponibilização da informação geográfica e de utilização on-line do SIG
Sistemas Corporativos (Groupware Systems - GS)	Possibilita o trabalho colaborativo em ambiente SIG, de múltiplos usuários em diferentes localizações geográficas como diferentes comitês ligados a planejamento e tomada de decisão.

Um sistema de apoio à decisão é projetado especificamente para dar suporte ao usuário no tratamento de problemas semi-estruturados. Embora uma aplicação de um SDSS para um problema de tomada de decisão possa aumentar a eficiência dos dados e do processamento das informações, este não é o principal objetivo do sistema. O que é mais importante nesses sistemas é melhorar a eficiência da tomada de decisão ao incorporar julgamentos (preferências) e utilizar programas computacionais no processo de solução do problema. O sistema deve assim permitir uma variedade de “estilos” de tomada de decisão (padrões/maneiras diferentes de decidir) que podem ser utilizadas em um problema específico. Conseqüentemente, a idéia chave de um SDSS é que este sistema não substitua o julgamento do usuário mas que permita a este usuário tomar decisões “melhores”. Esta melhoria na qualidade das decisões em um SDSS envolve conhecimento, intuição, experiência, criatividade, etc, dos usuários. Ele deve disponibilizar informações estruturadas com ponderações e preferências agregadas, as quais dificilmente seriam descritas através de uma linguagem informal. O sistema deve auxiliar o usuário a explorar o problema decisório de forma interativa e recursiva.

Neste sentido, a capacidade de um SIG de incorporar preferências no processo de planejamento é de fundamental importância se o SIG está sendo utilizado como SDSS. Um SDSS requer a representação espacial de julgamentos, valores, argumentos e opiniões no sistema. Uma forma de fazer isso é a incorporação de técnicas analíticas de decisão (ex: análises multicritério) internamente ao ambiente do SIG em um processo decisório. Enquanto os SIGs podem gerenciar e manipular uma quantidade muito grande de informações acerca dos conflitos em um processo decisório, com um alto nível de qualidade, as técnicas analíticas de apoio à decisão podem ajudar a diminuir estes conflitos de valores entre as partes interessadas na tomada de decisão (Feick & Hall, 1999; Jankowski and Nyerges, 2001).

Dentro deste contexto, o problema principal na utilização de um SIG como SDSS é a “formalização do conhecimento” de maneira que estas técnicas analíticas incorporadas à maioria dos sistemas atuais possam efetivamente auxiliar na tomada de decisão. Este processo de formalização do conhecimento perpassa por diversos tipos de conversões de informações, espacialização de dados inicialmente não-espaciais, modelagem conceitual de processos decisórios, sobreposição de planos de informação, álgebra de mapas, dentre outras atividades, que nem sempre estão explícitas nos menus e comandos dos pacotes de SIG disponíveis e, na maioria das vezes, demandam um conhecimento mais aprofundado tanto da ferramenta, quanto do processo decisório a ser representado e apoiado por esta ferramenta.

Exemplos de aplicações de SIG como SDSS podem ser observados em diversos campos do conhecimento humano. Métodos de integração de Análise Multicriterial e SIG podem ser encontrados em vários trabalhos (Pettit & Pullar, 1999; Malczewski, 1999; Yaldir & Rehman, 2002;

Mendoza et al., 2002). Maniezzo (1998), apresenta a utilização de algoritmos e regras heurísticas, além de análise multicriterial em problemas de localização (siting problems/siting decisions). A utilização de SIG em situações extremas (catástrofes/desastres) como sistemas de apoio à decisão é cada vez mais freqüente (Zerger & Smith, 2003).

Em modelos ambientais o objetivo principal da utilização do SIG como SDSS tem sido melhorar a qualidade dos dados e, em última instância, das decisões a serem tomadas (Bian, 2003; Silva, 2001). Em aplicações no campo dos recursos hídricos, a utilização de Sistemas de Informação Geográfica não substitui a necessidade por gestores, hidrólogos ou outros técnicos, mas procura aumentar a habilidade dos mesmos para tomar decisões responsáveis e oportunas (Olivera, 1996; Ochola & Kerkides, 2003; Al- Sabhan, 2003; Alcoforado & Cirilo, 2001).

2.3. Modelagem e Representação de Conhecimento em Sistemas de Informação Geográfica

*“O termo informação pode ser entendido como
obtenção ou ganho de conhecimento”
(Pierre Levy)*

Um Sistema de Informação Geográfica é uma estrutura computacional especificamente destinada a operar sobre dados de diferentes origens e produzir ganho de conhecimento (informação) sobre as relações espaciais neles eventualmente identificáveis (Silva, 2001). Genericamente, o termo informação é usado para se referir a todas as maneiras de descrições ou representações de sinais ou dados. Entretanto é importante reconhecer que existem, de fato, quatro classes diferentes de informação, que são as seguintes: dados, informação, conhecimento e inteligência (Urdaneta, 1992). Uma descrição detalhada de cada uma destas classes foi estabelecida por Moresi (2000) e é apresentada a seguir.

Dados compreendem a classe mais baixa de informação e incluem os itens que representam fatos, textos, gráficos, imagens estáticas, sons, segmentos de vídeo analógicos ou digitais etc. Os dados são coletados, por meio de processos organizacionais, nos ambientes interno e externo. Em suma, dados são sinais que não foram processados, correlacionados, integrados, avaliados ou interpretados de qualquer forma. Esta classe representa a matéria-prima a ser utilizada na produção de informações. *Informações* são dados que passam por algum tipo de processamento para serem exibidos em uma forma inteligível às pessoas que irão utilizá-los. O processo de transformação envolve a aplicação de procedimentos que incluem formatação, tradução, fusão, impressão e assim por diante. A maior parte deste processo pode ser executada automaticamente. Uma vez que dados

tenham sido transformados em informações, pelo menos em uma interpretação inicial, é possível refinar as informações mediante um processo de elaboração. As informações resultantes deste processo incluem características adicionais do problema, geram hipóteses, conseqüências das hipóteses, sugerem soluções para problemas, explanação e justificativas de sugestões, crítica de argumentos etc. O conhecimento, por sua vez, é obtido pela interpretação e integração de vários dados e informações para iniciar a construção de um quadro de situação. O processo de transformação é realizado por meio de avaliação de dados e informações. O conhecimento não é estático, modificando-se mediante a interação com o ambiente. Além disto, conhecimentos novos podem resultar de um processo de inferência na própria estrutura do conhecimento.

O nível mais alto desta hierarquia é a *inteligência*, que pode ser entendida como sendo a informação como oportunidade, ou seja, o conhecimento contextualmente relevante que permite atuar com vantagem no ambiente considerado. Também pode ser vista como o conhecimento que foi sintetizado e aplicado a uma determinada situação, para ganhar maior profundidade de consciência da mesma. Portanto, a inteligência resulta da síntese de corpos de conhecimentos, sendo usados julgamento e intuição daquele que toma decisões e obtida uma visualização completa da situação.

2.3.1. Funções do SIG

Para realizar a modelagem e representação de conhecimento em Sistemas de Informação Geográfica, são necessárias diversas atividades como: conversões de informações, espacialização de dados inicialmente não-espaciais, modelagem conceitual de processos decisórios, sobreposição de planos de informação, álgebra de mapas, dentre outras, que nem sempre estão explícitas nos menus e comandos dos pacotes de SIG disponíveis e, na maioria das vezes, demandam um entendimento mais aprofundado tanto da ferramenta, quanto do processo decisório a ser representado e apoiado por esta ferramenta

Malczewski (1999), discorre sobre a funcionalidade de um SIG enquanto um sistema de apoio à decisão espacial e faz uma distinção entre as suas funções de acordo com o grau de complexidade de suas aplicações. Esta distinção entre funções *básicas* e *avançadas* é muito difundida e, pode-se dizer, que a qualidade de uma modelagem de dados no SIG é maior, quanto maior for o conhecimento aprofundado e a utilização eficiente destas funções.

2.3.1.1. Funções básicas

Incluem as funções de *medida*, *(re)classificação*, *escala*, *sobreposição*, *vizinhança* e de *conectividade*. Os Sistemas de Geoprocessamento mais populares como o ARC/INFO-ArcView-ArcGIS (ESRI – Environmental Systems Research Institute), o IDRISI (Clark Labs), o GRASS (U.S. Army Corps of Engineers), o SPRING (DPI/INPE), Geomedia (Intergraph Corporation) e o MapInfo (Mapinfo Corporation), possuem a maioria, senão todas, estas funções básicas.

* Funções de Medida

A possibilidade de calcular os parâmetros mensuráveis dos objetos espaciais é considerada uma das capacidades analíticas de maior importância de um SIG pelas possibilidades de aplicação das mesmas. Por exemplo: a gestão cadastral baseia grande parte de suas possibilidades no cálculo automático de superfícies a partir da digitalização do cadastro. Dentre as principais funções de medida podem ser citadas as operações de ponto em polígono, linha em polígono, medidas de comprimento, área e volume.

As operações de medição realizadas em um SIG vetorial são mais precisas do que as realizadas em um SIG raster. Isto se deve ao fato de que em um SIG raster, para a obtenção de uma medida da realidade o número de células (pixels) tem que ser convertidos em distância ou em área e a precisão fica então limitada ao tamanho da célula (Ex: resolução de 20 m, 10 m, etc.). No SIG vetorial a precisão é determinada pela forma com a qual os pontos, linhas e polígonos foram armazenados no banco de dados.

* Funções de (re)classificação

Os procedimentos de reclassificação podem ser agrupados em duas categorias: a que envolve *atributos temáticos* associados com as camadas de informação e a que é baseada nas *propriedades topológicas* dos objetos em uma determinada camada temática. No primeiro caso os valores de saída são atribuídos em função dos valores de entrada. Na reclassificação topológica (segundo caso), os novos valores são atribuídos como uma função da posição, da contigüidade, do tamanho ou da forma, dos padrões espaciais representados na camada de entrada.

A reclassificação pode simplificar a informação (Figura 3). Por exemplo sobre uma camada temática que contem as espécies vegetais e apresenta dez classes, pode ser aplicada uma reclassificação transformando a legenda original em apenas três classes agrupando algumas das classes originais.

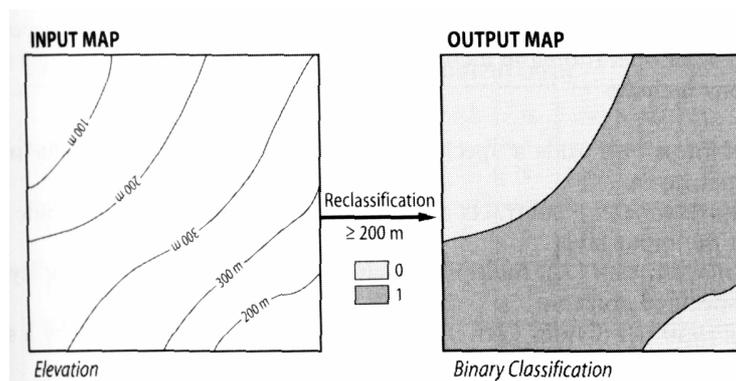


Figura 3 – Exemplo de reclassificação em um mapa de altimetria (Malczewski, 1999).

*** Funções escalares**

Este tipo de operação faz uso de uma constante (escalar) e uma operação aritmética (adição, subtração, multiplicação, exponenciação, etc.). O tema de saída contém novos valores de atributos resultantes do tipo de operação aritmética e do valor da constante utilizada (Figura 4).

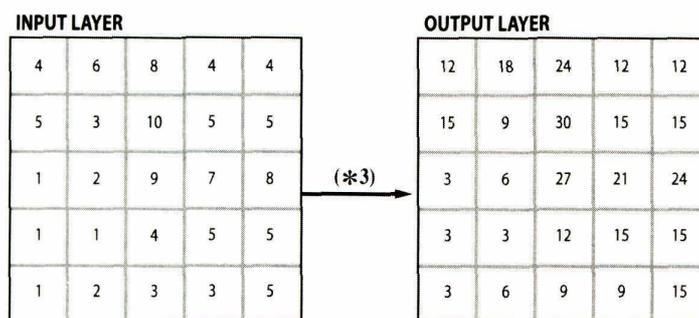


Figura 4 – Exemplo de uma operação de multiplicação em um tema raster (Malczewski, 1999).

*** Funções de Sobreposição (overlay)**

A sobreposição é uma das funções mais utilizadas em um SIG. A própria estrutura destes sistemas permite a utilização de uma série de camadas de informação de maneira que a sobreposição já é uma premissa para o seu funcionamento. Nos sistemas raster a sobreposição de grades geram uma nova grade com um atributo resultante que dependerá do tipo de operador (lógico ou matemático) utilizado. Em sistemas vetoriais a sobreposição de camadas apresenta uma complexidade adicional pois afeta tanto o componente espacial como o não espacial da informação. A partir da sobreposição de polígonos por exemplo, pode se gerar uma nova camada de informação com uma nova estruturação topológica (relações espaciais entre os objetos). Estas operações requerem que todas as camadas de informação envolvidas tenham a mesma referência geográfica (um sistema de referência comum). Dependendo da natureza dos dados, as operações de sobreposição podem ser efetuadas utilizando-se de operadores lógicos, aritméticos, probabilísticos, ou difusos (lógica fuzzy).

* Funções de Vizinhança

Este tipo de operação designa valores para uma localização de acordo com as características de uma área vizinha. Para executar estas funções pelo menos três parâmetros tem que ser especificados: a localização dos elementos de referência, localização da região de interesse (por exemplo, a área em torno dos elementos de referência) e a função segundo a qual a consulta deve ser realizada (um raio de 10m, distantes mais de 5m, etc). As funções de vizinhança incluem procedimentos de busca, de cálculo de superfícies (cálculo de declividades, direção de fluxo, visibilidade, bacias hidrográficas, volumes, iluminação, etc.) e de interpolação (estimativa de valores desconhecidos de uma variável concreta em localizações concretas a partir de valores conhecidos em localizações vizinhas).

* Funções de Conectividade

O conceito de conectividade adquire conotações diferentes no contexto de um SIG vetorial e de um SIG raster. Para uma estrutura vetorial a conectividade é usada para descrever a ligação entre dois pontos, linhas ou polígonos um para com o outro. É uma das propriedades que descreve as relações topológicas entre os objetos. Nos dados em formato raster o mesmo termo é usado para definir ligações entre pixels, ou seja, o quanto dois ou mais pixels estão ou não conectados. Estas operações podem incluir conceitos de proximidade, buffering, espalhamento, análise de redes, custo espacial, traçado ótimo, etc. Uma das aplicações específicas de operações de proximidade, por exemplo, são os polígonos de Thiessen, muito usado em aplicações hidrológicas (Figura 5).

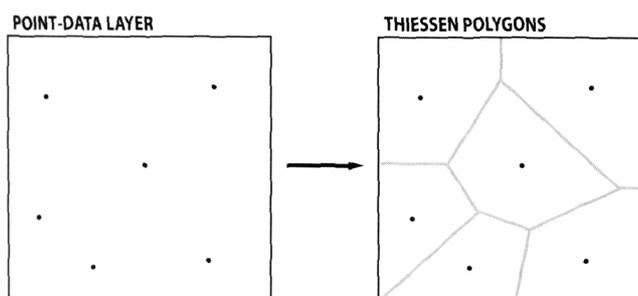


Figura 5 – Operações de conectividade-Polígonos de Thiessen (Malczewski, 1999)

2.3.1.2. Funções Avançadas

Muitos dos Pacotes de SIG do mercado incluem tudo ou a maioria destas operações de análise espacial citadas anteriormente. Porém, estas operações são operações geométricas simples, consideradas de baixo grau de dificuldade e podem ser entendidas simplesmente como ferramentas que constroem relações espaciais entre objetos. Para que um SIG se torne útil para tomada de decisão, o sistema deve ser capaz de realizar operações matemáticas e estatísticas de manipulação de

dados baseados em modelos teóricos. As funções avançadas do SIG podem ser subdivididas em duas categorias: funções de *Modelagem Estatística* e *Modelagem Matemática*.

✱ Modelagem Estatística

É comum a distinção entre a estatística convencional e estatística espacial ou geoestatística. A estatística convencional pode ser utilizada para analisar dados espaciais mas normalmente ela não considera a natureza específica do dado geográfico. A estatística espacial trata de caracterizar o espaço geográfico através de análises do modelo de distribuição dos dados espaciais. Este aspecto a distingue da estatística tradicional. Existem atualmente três estratégias distintas no sentido de integrar as áreas de estatística e SIG: a estratégia de aproximação, estratégia de modulação, e a aproximação de dados de importação/exportação. A *estratégia de aproximação* procura integrar a estatística convencional e espacial com o Sistema de Informações Geográfica. A *estratégia modular* envolve a utilização de módulos estatísticos externos que funcionam em conjunto com o SIG. A estratégia de aproximação dos dados de importação/exportação envolve um conjunto de ferramentas de análise espacial disponíveis em um SIG que possibilita a transferência de dados entre pacotes SIG e pacotes estatísticos.

✱ Modelagem Matemática

Existem duas grandes áreas em modelagem matemática dentro de um ambiente SIG: a *otimização* e a *simulação*. Cada uma delas representa uma abordagem diferenciada para a solução de problemas. De forma geral pode-se dizer que, o resultado (dados de saída) obtido no modelo de otimização, é uma prescrição de uma estratégia para a solução de um problema. Por outro lado, na simulação temos uma aproximação descritiva da solução de um problema. Dentre os tipos de otimização existentes tem-se a programação linear, programação inteira, programação de análises de redes, etc. Geralmente nos modelos de otimização o objetivo é encontrar a melhor solução (máxima ou mínima) para um determinado problema de gerenciamento. Se o problema envolve mais de um objetivo a ser otimizado simultaneamente, este modelo é chamado de um problema de decisão *baseado em múltiplos objetivos*. Em geral os SIG apresentam limitações para resolver problemas de otimização. Os SIGs com estrutura de dados vetorial e os orientados a objetos são mais aptos a incorporarem rotinas de otimização. Vários pacotes comerciais suportam algum tipo de procedimento de otimização, particularmente os modelos de análises de redes tem sido incorporados efetivamente nos sistemas SIG.

A otimização especifica as ações que satisfazem o objetivo específico, estabelecendo condições ótimas e analisando os efeitos das variações no sistema nas proximidades do ponto ótimo. Em contra partida, a modelagem matemática por simulação é uma abordagem exploratória para os

problemas de tomada de decisão. Ela reproduz (simula) um processo para obter uma amostra dos possíveis resultados. A alta disponibilidade de linguagens de simulação, aliada a computadores com grande capacidade de processamento, tem tornado a simulação um método de modelagem extremamente aceito pelas análises baseadas em SIG. Assim como na modelagem estatística, existe a possibilidade de importação/exportação de dados entre o SIG e pacotes de modelagem matemática, como modelos de fluxo subterrâneo, modelos de precipitação, etc.

2.3.2. O SIG como SAD

*“Ora, com a informatização constata-se a emergência de um novo tipo de gestão social dos conhecimentos: pensa-se com a ajuda dos **procedimentos formais, de modelos computacionais**”.*

(Pierre Levy)

Para verificar a viabilidade do uso de um Sistema de Informação Geográfica como um Sistema de Apoio à Decisão, pode-se retornar ao conceito de Simon (1960) ampliado por Shim (2002), observando *como* e *quanto* o SIG pode dar o suporte necessário em cada uma das três fases do processo de tomada de decisão (Figura 6). Para tanto, são apresentadas a seguir algumas considerações:

SIG na fase de Inteligência

O ponto de partida de qualquer processo de tomada de decisão é o reconhecimento do problema. Decisões são necessárias quando um problema existe, quando alguma coisa está errada, ou quando algo deve ser melhorado. Sendo assim, a fase de inteligência requer que o ambiente decisório seja completamente explorado para que se estabeleçam as condições necessárias para a tomada de decisão. Converter um problema real em um banco de dados de um SIG envolve algumas questões como: Quais as variáveis da realidade que devem ser observadas, selecionadas, filtradas, classificadas e gravadas como dados e qual a relevância destes dados no processo decisório? Uma vez identificadas as decisões espaciais em questão, os dados devem ser manipulados, analisados e ponderados para obter informações sobre o problema.

Parece inegável que o SIG é o instrumento adequado para auxiliar nesta fase do processo de tomada de decisão, pois oferece ferramentas para manipulação e análise de um grande volume de informações, de forma bastante eficiente. Dados de diversas fontes e áreas de conhecimento podem ser cruzados (recursos hídricos, dados censitários, dados de saúde pública, etc.) e analisados de forma conjunta.

SIG na fase de Projeto

Diante do conhecimento do problema, as alternativas possíveis podem ser apontadas para o tomador de decisão. Esta fase envolve a criação, desenvolvimento e análise de um conjunto de possibilidades de decisão para o problema identificado. A capacidade de o SIG gerar este conjunto de alternativas de decisão está baseada principalmente nos princípios de relacionamento espacial como conectividade, proximidade e métodos de sobreposição. Um modelo formalizado/estruturado é comumente utilizado para auxiliar a geração do conjunto de alternativas. Além disso, a maioria dos Sistemas SIG comerciais apresentam recursos de análise espacial e modelagem necessários para dar suporte à decisão. Alguns modelos matemáticos e estatísticos podem ser usados nesta fase internamente ou externamente ao ambiente do SIG, sendo seus recursos de visualização muito úteis na representação de parâmetros para estes modelos.

SIG na fase de Escolha

A avaliação das alternativas possíveis é a característica principal desta fase do processo de tomada de decisão. Cada alternativa é então avaliada e analisada com relação às demais através de uma regra de decisão específica. Esta regra é utilizada para ordenar as alternativas em “graus” de prioridade. Alguns destes sistemas já possuem alguma integração com técnicas analíticas, (ex: análise multicriterial), com a possibilidade de utilização de diferentes métodos de ponderação e de padronização dos critérios envolvidos na análise. O sucesso da utilização de um SIG na fase de escolha dependerá da utilização otimizada destes recursos bem como de pacotes com funções adicionais que agregam ao SIG esta capacidade de simular preferências, além de diferenciar critérios de adequação de critérios restritivos, etc.

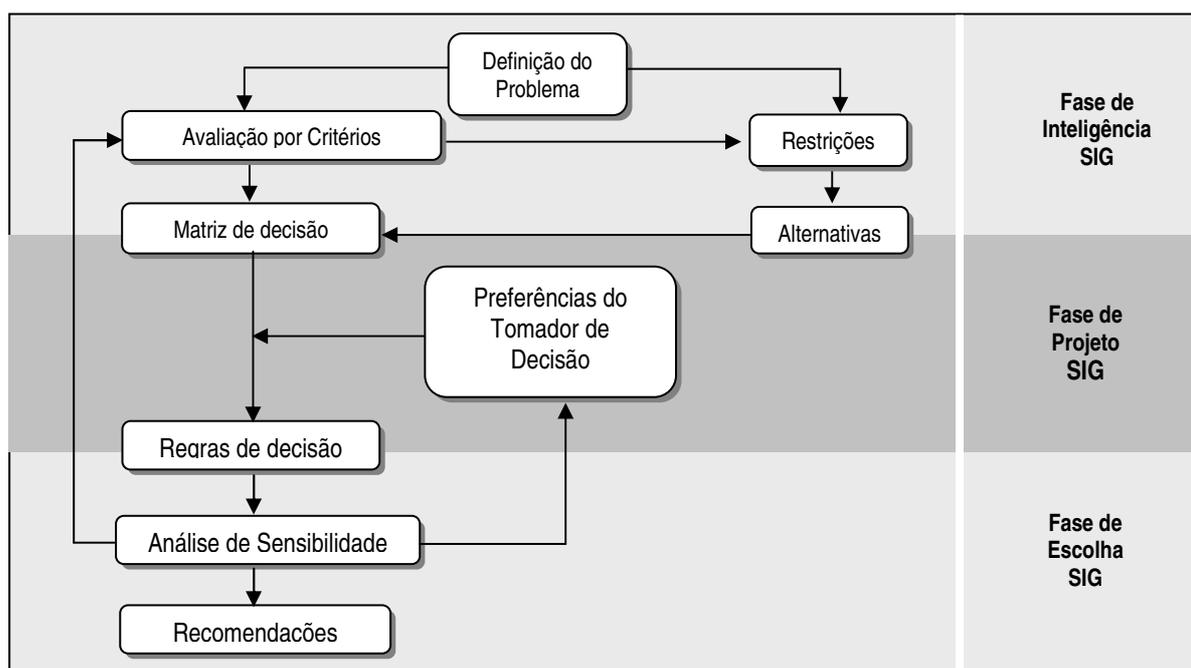


Figura 6 – SIG nas três fases do processo decisório (adaptado de Malczewski, 1999)

2.3.3. Gerenciamento do Conhecimento

Embora esta sistematização do processo decisório nas três fases estabelecidas por Simon em um ambiente SIG seja teoricamente possível, do ponto de vista operacional, algumas dificuldades podem ser enfrentadas. Em primeiro lugar, o fato de o SIG permitir o armazenamento e manipulação de um grande número de informações de diferentes tipologias já é por si só um agente complicador. Temas diversos, inúmeras planilhas, modelos numéricos, etc, geram um volume de dados que para se tornar “informação utilizável” (ou até mesmo “útil”) deve ser submetido a um gerenciamento eficiente. Além disso, para que preferências sejam agregadas a estas informações na fase de escolha, o próprio conhecimento especializado (que baliza a inserção de preferências) tem que ser muito bem gerenciado tanto na sua aquisição quanto na sua implementação na base de dados do SIG. A Tabela 2 apresenta algumas questões relevantes apontadas por West & Hess (2002) no que diz respeito às atividades que envolvem o gerenciamento do conhecimento em SIG.

Tabela 2:
Questões de Gerenciamento do Conhecimento (GC) em SIG (adaptado de West & Hess, 2002)

Tarefa/Atividade	Descrição	Questões de GC	Tipo de Conhecimento
Identificand o Temas Relevantes	Em um ambiente ou sistema contendo um grande número de planos de informação, nem sempre será claro qual o plano de informação a ser consultado ou considerado para uma tomada de decisão específica;	Relacionamentos	<i>Declarativo:</i> Existência do tema, conteúdo do tema, relevância do tema no processo de tomada de decisão, confiabilidade dos dados, existência de técnicas analíticas, conveniência destes tipos de temas para estas técnicas específicas;
Análise Espacial	Muitas decisões em SDSS exigem análise de dados a partir de diferentes planos de informações para identificar o relacionamento entre os dados. Para tanto, são utilizados operadores espaciais e analíticos de reclassificação, de junção espacial, ou algoritmos de rede como “caminho ótimo”, etc;		<i>Metodológico:</i> Como recuperar e carregar o tema, como usar os temas com as técnicas analíticas específicas;
Editando/ adicionando dados	A integridade dos dados é uma questão chave em qualquer sistema de banco de dados e o SIG é um sistema de banco de dados. O acesso de usuários finais ao SIG deve apresentar proteção contra os problemas convencionais de integridade de dados, como também contra os problemas específicos do SIG;	Integridade	<i>Declarativo:</i> Tipos de dados necessários nos campos, se um campo requer um certo valor; <i>Metodológico:</i> Como criar novos registros em um tema de SIG quando ambos: atributos e feições espaciais têm que ser especificados;
Sobrepondo Temas	Quando os temas são apresentados em um monitor ou em um mapa impresso é importante que os temas com maior densidade de informação sejam visualizados por baixo dos temas com menor densidade de informação. A resolução também pode ser gerenciada de acordo com a quantidade de informação a ser visualizada;	Apresentação	<i>Declarativo:</i> Tipos de temas, densidade de dados, resolução apropriada de visualização, campos de identificação dos mapas, cores das informações, símbolos adequados.
Apresentando Resultados	Criar mapas é muito mais complexo do que simplesmente imprimir o que está sendo visualizado no monitor. Decidir o quanto os diversos componentes dos mapas estão apropriados ou não e apresentar estes componentes em forma de resultados pode ser problemático para usuários inexperientes;		<i>Metodológico:</i> Como sobrepor os temas apropriadamente.; como ativar e desativar a resolução apropriada, como aplicar símbolos e etiquetas nos mapas, como adicionar os demais elementos como legenda, escalas, etc. necessários para uma leitura correta dos dados;

A preocupação com a representação do conhecimento em SIG é uma tendência que pode ser observada em uma análise epistemológica que Câmara et al. (2002) fazem do geoprocessamento, a qual, é resumidamente apresentada em uma tabela comparativa das geotecnologias desenvolvidas nas duas últimas décadas (Tabela 3), apontando as tendências futuras. Desta forma, estes autores apresentam uma distinção entre os conceitos da escola de Geografia Quantitativa que tem expressão na atual geração de SIG e aqueles que apontam para a futura evolução da tecnologia de Geoprocessamento.

Tabela 3:
Teoria Geográfica e Geoprocessamento (Câmara et al., 2002)

TEORIA	TECNOLOGIA GIS ASSOCIADA	CONCEITO CHAVE	REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL	TÉCNICAS DE ANÁLISE
Geografia Idiográfica	Anos 80 - meados dos anos 90	Unicidade da Região – Unidade: Área	Polígono e Atributos	Intersecção Conjuntos
Geografia Quantitativa Fase 1	Final da década de 90	Distribuição Espacial	Superfícies (Grades)	Geoestatística e Lógica Difusa
Geografia Quantitativa Fase 2	Meados da década de 2000	Modelos Espaço Tempo	Funções	Modelos Multi Escala
Geografia Crítica	Segunda década do século 21?	Objetos e Ações Espaços de Fluxos e Espaços de Lugares	Ontologias e Espaços não cartográficos	Representação do conhecimento

- *Geografia Idiográfica (SIG dos anos 80)*: o conceito-chave é a unicidade da região, expresso através de abstrações como a “unidade-área”, “unidade de paisagem” e “land-unit”. A representação computacional associada é o polígono com seus atributos (usualmente expressos numa tabela de um banco de dados relacional) e entre as técnicas de análise comuns, está o uso da intersecção de conjuntos (lógica booleana).

- *Geografia Quantitativa Fase 1*:: o conceito-chave é a distribuição espacial do fenômeno de estudo, expressa através de um conjunto de eventos, amostras pontuais, ou dados agregados por área. A representação computacional associada é a superfície (expressa como uma grade regular) e há uma grande ênfase no uso de técnicas de Estatística Espacial e Lógica Nebulosa (“fuzzy”) para caracterizar com o uso (respectivamente), da teoria da probabilidade e da teoria da possibilidade, as distribuições espaciais.

- *Geografia Quantitativa Fase 2 (SIG de hoje)*: o conceito-chave são os modelos preditivos com representação espaço-temporal, onde a evolução do fenômeno é expressa através de representação funcional. Para capturar as diferentes relações dinâmicas, as técnicas de análise deverão incluir modelos multi-escala, que estabeleçam conexões entre fenômenos de macroescala (tipicamente

relacionados com fatores econômicos) e fenômenos de microescala (tipicamente associados a transições no uso da terra).

- *Geografia Crítica (SIG do futuro)*: Podemos apenas especular sobre as representações computacionais que serão utilizadas neste contexto, que possivelmente incluam técnicas de Representação de Conhecimento. Os SIGs do futuro contemplarão representações não-cartográficas do espaço, com uma ênfase no estabelecimento de relações entre os diferentes atores sociais que atuam no espaço.

Com base nesta visão prospectiva do SIG, pode-se afirmar que o desenvolvimento eficiente de sistemas de informação e conseqüentemente um gerenciamento eficiente do conhecimento nestes sistemas dependem da construção de modelos conceituais que sejam representativos da porção modelada da realidade. Os modelos sempre representam sínteses, não podendo ao mesmo tempo conter *todos* os aspectos da realidade a ser representada, tendo que se restringir aos eventos e entidades relevantes.

Nesse sentido, a utilização de fluxogramas no processo de modelagem do problema decisório é uma prática usual. O desenvolvimento de programas que auxiliem na criação destes fluxogramas, permitindo uma interação direta entre os modelos conceituais e o SIG, bem como entre os diversos agentes decisores e o modelo conceitual sem que seja necessário um alto nível de conhecimento da ferramenta SIG a ser utilizada, tem apontado como uma forte tendência, por reduzir o tempo de implementação, ao passo que promove um gerenciamento mais eficiente de todo o processo decisório (ESRI, 2000; Seffino et al., 1999).

Esta prática possibilita uma melhor sistematização das possibilidades para a tomada de decisão, além de permitir a inclusão de novas alternativas que dificilmente seriam consideradas sem a visualização estruturada do problema como um todo. Em um SIG para que um processo decisório seja sistematizado em fases como na estrutura proposta por Simon (Figura 1), todas estas questões de representação e gerenciamento do conhecimento devem ser consideradas.

2.3.4. Inferências Espaciais e Apoio à Decisão

Pode-se afirmar que em um SIG a principal proposta é a combinação de dados espaciais, com o objetivo de descrever e analisar interações, para fazer previsões através de modelos, e fornecer apoio nas decisões tomadas por especialistas, gestores, técnicos, etc. Existem, entretanto, diferentes técnicas de análise espacial que permitem a produção de novos mapas a partir de dados já existentes. Estas análises também são chamadas de *inferências espaciais*.

Inferência Espacial pode ser entendida como a geração de planos de informação a partir de dados existentes (Câmara et al., 2002; Silva, 1999). Vale salientar, entretanto que, a partir de diferentes métodos de inferência podem ser gerados dados em *diferentes formatos* e com *diferentes níveis de confiabilidade*.

Teoricamente, os modelos de processos decisórios no contexto de SIG, podem ser descritos em última instância como a combinação de um conjunto de dados de entrada que, através de uma função, produzem um novo dado de saída, o que matematicamente poderia ser assim representado:

$$\text{Saída} = f(\text{dados de entrada})$$

De acordo com Câmara et al. (2002) a função, f , pode tomar muitas formas diferentes, mas os relacionamentos expressos por esta função podem ser baseados no entendimento *teórico* de princípios físicos, químicos, ou podem ser *empíricos*, baseados em dados observados, em conhecimento acumulado sobre a área de estudo, etc, ou ainda, na combinação destes dois tipos anteriores.

Um exemplo de um modelo teórico seria o modelo de circulação de águas de um lago: usam-se como dados de entrada mapas de profundidade do lago, mapa de declividade do fundo do lago, fluxo de entrada e de saída, etc, e tem-se como resultado, campos de velocidades. Exemplos de modelos empíricos seriam os modelos baseados em *relacionamentos estatísticos* ou *relacionamentos heurísticos* como os de predição mineral. Nestes últimos, os relacionamentos espaciais entre as variáveis de estudo, são estimados por critérios estatísticos, a partir de amostras de uma região experimental, ou a partir de um conjunto de classes, onde os limiares destas classes são definidos por especialistas.

Os modelos empíricos podem ser divididos em dois tipos; *modelos baseados em conhecimento*, que são implementados a partir do conhecimento de especialistas e *modelos baseados em dados*, que são implementados a partir de um conjunto de dados observados. Nestes modelos, diferentes técnicas de inferência espacial podem ser utilizadas no contexto de produção de novos mapas a partir de dados já existentes. Estes métodos geram como resultado, planos de informação em diferentes formatos. Nos modelos baseados em conhecimento geralmente são utilizados a análise *Booleana*, a *Média Ponderada* e a *Lógica Difusa*. Nos modelos baseados em dados (quando os dados disponíveis são suficientes para que se possa estimar a contribuição de determinados atributos no processo de modelagem), recorre-se a métodos estatísticos que são aplicados sobre estes dados como os métodos *Bayesiano* e a inferência por *Redes Neurais*. Este trabalho se limita ao uso de modelos baseados em conhecimento e por este motivo são apresentadas a seguir os conceitos e definições pertinentes a estes modelos.

2.3.4.1. Modelos Baseados em Conhecimento

Nestes modelos, são necessárias as informações de entrada e uma metodologia que torne possível descobrir localizações ou zonas que satisfaçam a um conjunto de critérios. Se o critério é definido segundo regras determinísticas, o modelo consiste em aplicar operadores de lógica booleana em um conjunto de dados (mapas) de entrada. O dado de saída é um mapa binário onde cada ponto no mapa, satisfaz ou não as condições do modelo (Bonham-Carter, 1994).

De um modo alternativo, cada localização pode ser avaliada de acordo com critérios ponderados, que resultam em um patamar (grau) em uma escala de potencialidade (Bonham-Carter, 1994). Este método tem como vantagem a habilidade de avaliar graus de potencialidade em vez de apenas avaliar presença ou ausência da potencialidade. A potencialidade é calculada pela ponderação e combinação de evidências de fontes múltiplas. A avaliação do peso a ser atribuído a um mapa depende da análise da importância da evidência em relação a uma ocorrência conhecida ou do julgamento subjetivo de especialistas (Câmara et al., 2002).

2.3.4.2. Análise Booleana Simples

O Modelo *Booleano* envolve combinação lógica de mapas binários através de operadores condicionais. A álgebra *booleana* utiliza os ponderadores lógicos “E”, “OU”, “Exclusivo OU (XOR)” e “NÃO” para determinar se uma hipótese satisfaz ou não uma particular condição. Os vários planos de informação são combinados para dar suporte a uma hipótese ou preposição. Cada localização é então testada, para determinar se as evidências nesse ponto satisfazem ou não as regras definidas pela hipótese. O resultado é expresso de forma binária, “0” (hipótese não satisfeita) e “1” (hipótese satisfeita), não sendo possível a condição “talvez”. Se os critérios forem combinados utilizando o operador AND a avaliação deve encontrar todos as áreas aptas que atendam a *todos* os critérios submetidos a análise. Se o operador lógico OR for utilizado deverão ser encontradas áreas que atendam *ao menos um* dos critérios selecionados. A Figura 7 torna mais claro o entendimento deste método.

O apelo da abordagem *Booleana* é sua simplicidade. A combinação lógica de mapas em SIG é diretamente análoga a sobreposição de “overlayers” de mapas em uma mesa de luz, método este tradicionalmente utilizado por geólogos. Em casos onde limiares de corte foram estabelecidos por lei ou por códigos, combinações booleanas são abordagens práticas e de fácil aplicação. Na prática, entretanto, normalmente não é indicado a atribuição de importâncias iguais para cada critério a ser combinado. Evidências precisam ser ponderadas dependendo da sua importância relativa (Bonham-Carter, 1994).

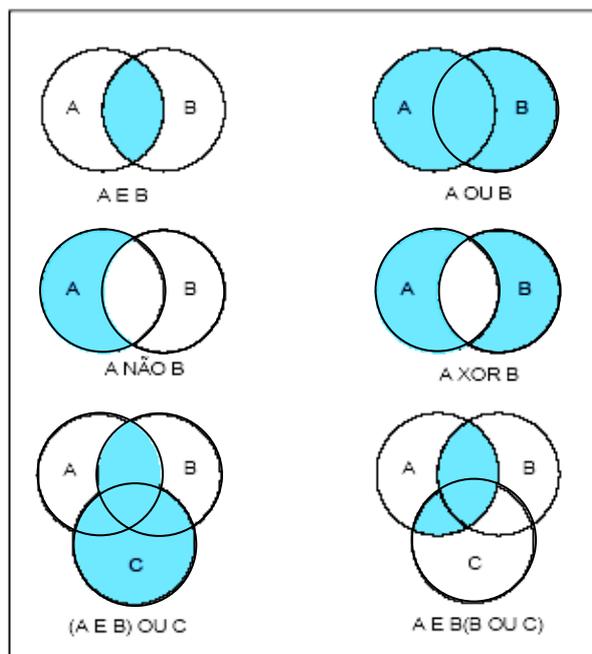


Figura 7 - Diagrama de Venn mostrando os resultados da aplicação de operadores de lógica *booleana* para dois ou mais conjuntos (Burrough & McDonnell, 1998).

2.3.4.3. Combinação Linear Ponderada

Neste método cada mapa de entrada será utilizado como uma evidência que receberá um peso diferente dependendo da importância para com a hipótese sobre consideração. Neste caso cada plano de informação receberá pesos diferentes, bem como as respectivas classes dos planos de informação. O resultado será um mapa com áreas que expressam um grau de importância relativa através dos valores numéricos de saída

Este tipo de análise espacial não apenas considera toda a variabilidade dos dados contínuos mas oferece também a possibilidade dos critérios compensarem-se uns com os outros. Um escore de aptidão baixo em um critério para uma área qualquer pode ser compensado por um escore alto de aptidão em outro critério (Eastman, 1999). Esta compensação é determinada por um conjunto de pesos dos critérios que indica a importância relativa de cada plano de informação. Este procedimento é baseado nas médias, o que coloca a análise exatamente em uma posição intermediária das operações AND (mínimo) e do OR (máximo), isto é, nenhum risco extremo e nenhum extremo de aversão ao risco.

Para a atribuição destes pesos no ambiente alguns SIG's existentes no mercado incorporam a técnica AHP (Analytical Hierarchy Analysis/Análise Hierárquica Analítica) (Saaty, 1980) que consiste basicamente em ordenar os critérios através de uma matriz, onde os elementos $a(i,j)$ indicam a importância relativa atribuída pelo decisor entre o critério i e o critério j . Ou seja, os fatores são comparados aos pares e o usuário pode experimentar uma variedade de esquemas de ponderação

(atribuição de pesos) para encontrar a solução mais apropriada. O primeiro passo para a aplicação dessa técnica é a elaboração de uma relação de importância relativa entre as evidências. Essa relação é utilizada como dado de entrada na matriz de comparação pareada, onde são calculados os autovalores e autovetores da matriz. O método de Média Ponderada permite uma maior flexibilidade na combinação de mapas do que o método *Booleano*. O mapa ponderado pode ser ajustado para refletir o julgamento de um especialista, segundo os pesos de importância definidos para cada critério. A maior desvantagem deste método, entretanto, recai provavelmente no caráter linear de adição das evidências (Bonham-Carter, 1994).

2.3.4.4. Inferência Difusa (ou Fuzzy)

Neste método de agregação os fatores não são reduzidos a simples restrições booleanas. Pelo contrário, eles são padronizados para uma escala contínua de aptidão (de menos apto a mais apto). Reescalando os fatores para uma escala contínua torna-se possível a comparação e a combinação dos critérios de uma forma completamente diferente da análise booleana. Neste tipo de análise, pode-se usar o conceito *nebuloso* ou *fuzzy* para definir o limite entre o apto e inapto para os fatores.

Este procedimento apresenta um grau de complexidade maior que no caso booleano. Os fatores não são apenas reclassificados em termos de 0 e 1, mas reescalados de acordo com alguma função para um intervalo particular comum. Os fatores são considerados à luz de regras de decisão *fuzzy* onde áreas aptas e inaptas constituem medidas contínuas. Os fatores resultantes a serem produzidos serão desenvolvidos usando funções de associação a conjuntos difusos.

O conceito de conjuntos difusos ou nebulosos – *Fuzzy Sets* – foi proposto por Zadeh (1965), como uma generalização do conceito da Teoria Clássica dos Conjuntos. Os conjuntos *Difusos* são uma metodologia de caracterização de classes, que por varias razões não têm ou não podem definir limites rígidos (bordas) entre classes (Figura 8). Essas classes definidas de maneira inexata são chamadas de conjuntos *Difusos*. A utilização de um conjunto *Difuso* é indicada sempre que se tiver que lidar com ambigüidade, abstração e ambivalência em modelos matemáticos ou conceituais de fenômenos empíricos (Burrough & McDonnell, 1998). Os Sistemas Difusos de Regras (SDR) são a aplicação mais comum da Teoria dos Conjuntos Difusos (TCD). Estes sistemas são apropriados para modelar processos cujos comportamentos são descritos de forma aproximada ou através de regras heurísticas. Também são úteis quando o processo só pode ser descrito por um modelo matemático complicado ou caso se deseje maior robustez do sistema (Galvão e Valença, 1999). As vantagens do modelamento *fuzzy* são inúmeras quando comparadas às modelagens convencionais, que forçam os especialistas a definirem regras dicotômicas rígidas com contatos, normalmente artificiais, que diminuem a habilidade de articular eficientemente soluções para problemas complexos, tão comuns em processos naturais.

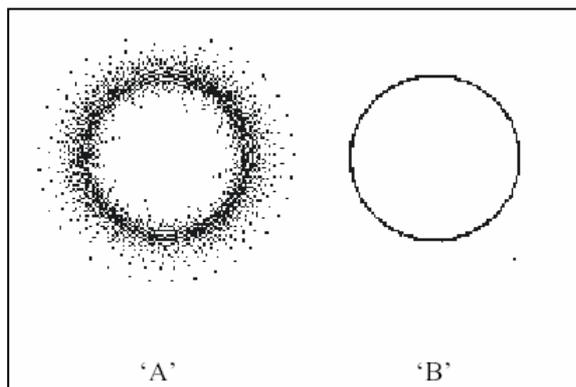


Figura 8 - Diagrama de Venn ilustrando a diferença de fronteira entre um conjunto fuzzy (A) e um conjunto booleano (B) (Burrough, 1998).

Assim como em conjuntos Booleanos, dados em conjuntos fuzzy podem ser manipulados utilizando métodos lógicos para selecionar e combinar dados provenientes de vários conjuntos. Para que isto seja possível, linguagens de consulta a sistemas gerenciadores de bancos de dados, precisam ser modificadas para tratar operações da lógica contínua. As operações básicas sobre subconjuntos fuzzy são similares e são uma generalização das operações básicas da lógica binária. Estas operações podem ser utilizadas de forma a se obter um dado resultante (mapa) da sobreposição de vários dados fuzzy (planos de informação). Alguns dos operadores fuzzy utilizados em SIG são: AND, OR, Soma Algébrica, Produto Algébrico, Operador Gama e Soma Convexa (Câmara et al., 2002).

2.4. Processos Decisórios em Recursos Hídricos

"Quando novas informações surgem e as circunstâncias mudam já não é possível resolver os problemas com as soluções de ontem."

(Roger Von Oech)

Na gestão de recursos hídricos a tomada de decisões envolve obrigatoriamente diversos aspectos além dos aspectos puramente hidrológicos. Devem ser consideradas características ambientais, econômicas, políticas, sociais, as quais, sofrem frequentemente variações ao longo do tempo e são sempre associadas a incertezas de difícil quantificação. Com o crescimento das demandas de água crescem simultaneamente os conflitos e disputas por este recurso natural e os sistemas de recursos hídricos tendem a se tornar maiores e mais complexos.

Nos dias atuais, embora os processos decisórios em recursos hídricos tenham se tornado mais abertos e, portanto mais democráticos, sua complexidade aumenta com a inserção de tantos níveis de informação, interesses e ideologias. A consciência ecológica e a tendência crescente de

participação pública, por exemplo, são características marcantes de nossos tempos e exigem mudanças de atitudes por parte dos administradores públicos.

Porto e Azevedo (1997) afirmam que o conceito de desenvolvimento sustentável, hoje aceito universalmente, exige a avaliação estratégica dos efeitos das decisões para que gerações futuras não sejam prejudicadas. Assuntos complexos, que há pouco tempo ficavam restritos a esferas técnicas, precisam ser comunicados e difundidos, em linguagem acessível ao leigo, para estabelecer canais adequados à participação pública.

Normalmente, o tomador de decisões, por força de suas atribuições, possui uma visão abrangente de seu campo de atuação e dos programas de ação, com os quais pretende realizar seus objetivos. Para tanto, articulam-se políticas, programas e projetos, os quais se transformarão em instrumentos no cumprimento de suas metas. No entanto, ao passar à fase de implementação, os dirigentes ressentem-se de ferramentas prospectivas apropriadas, que permitam resolver os problemas práticos encontrados na implementação de suas metas (Souza Filho e Gouveia, 2001).

Nesse sentido, são apresentadas a seguir, algumas características das informações que regem um processo decisório em recursos hídricos, consideradas de maior relevância no âmbito deste trabalho como a espacialidade e a incerteza (ou ausência) de informações e suas implicações no contexto da tomada de decisão em um Sistema de Informação Geográfica.

2.4.1. Espacialidade das Informações

Silva (1999) descreve os fenômenos relacionados ao mundo real de três maneiras: *espacial*, *temporal* e *temática*. *Espacial* quando a variação muda de lugar para lugar (declividade, altitude, profundidade do solo); *Temporal* quando a variação muda com o tempo (densidade demográfica, ocupação do solo) e *Temática* quando as variações são detectadas através de mudanças de características (geologia, cobertura vegetal).

Dentre estes fenômenos do mundo real, Mendes & Cirilo (2001) ressaltam que as funções que descrevem um fenômeno físico em recursos hídricos (como por exemplo: a transformação de precipitação em escoamento) são extremamente dependentes da escala (espaço e tempo) em que este fenômeno é observado. Estes autores afirmam que uma característica única dos recursos hídricos é a grande variabilidade espacial de suas propriedades. De uma forma geral, dados pontuais sobre a superfície (ou sub-superfície) de interesse dos recursos hídricos, bem como dados demográficos, indicadores sociais e econômicos, etc, apresentam uma grande variabilidade espacial, que pode ser caracterizada como *estocástica*, quando esta variabilidade é devida a causas aleatórias, ou *determinística*, quando as causas são conhecidas. Além disto, mudanças na escala de estudo do fenômeno podem introduzir uma variabilidade que pode ser adicionada às variações anteriores.

Estas fontes de variações (variabilidade natural e escala) afetam o comportamento hidrológico das bacias.

Neste sentido, os modelos hidrológicos distribuídos têm procurado descrever estas variabilidades (temporais e de escala), ao tratar a bacia hidrográfica como um conjunto de infinitos pontos, onde precipitação, infiltração, evaporação e escoamento formam elementos de um balanço hídrico local e em cada ponto podem ser obtidos valores médios associados à área (menor informação individualizada).

Mas a descrição do fenômeno físico não pode ser analisada isoladamente. Os estudos em recursos hídricos não podem limitar-se apenas à avaliação dos complexos processos hidrológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica. O desafio da gestão está justamente em resolver os conflitos existentes e promover um uso mais eficaz deste recurso natural – a água – considerando um contexto maior que integre tanto aspectos físicos, como ambientais, sociais e econômicos. Todos estes aspectos podem ser representados segundo sua distribuição espacial e a organização de todos estes aspectos em uma porção do território, ou conforme denominam Mendes & Cirilo (2001), a “organização do espaço produtivo” é então essencial neste contexto de planejamento integrado, dada a distribuição espacial e temporal dos recursos ambientais em termos quantitativos e qualitativos, a diversidade do meio físico e a pressão antrópica sobre as regiões.

Nesse contexto, o geógrafo brasileiro Milton Santos, define o espaço como “um sistema de objetos e um sistema de ações”. Esta definição não se limita a uma visão estática da realidade, pelo contrário, ela inclui uma noção complementar de “sistemas de ações”, as quais, apontam para a necessidade de capturar-se (explicitamente) os fatores de mudança: O cerne do argumento de Santos é que “*geometrias não são geografias*” (Santos, 1996) e o grande desafio está em um entendimento de espaço que ultrapasse a produção de mapas coloridos. Afinal, para quem toma decisões, as ações e os processos são componentes fundamentais.

2.4.2. Incerteza e ausência das informações

Segundo Vieira (2001), todas as atividades humanas são eivadas de incertezas, quer decorrentes da própria limitação biológica, quer oriundas da randomicidade dos fenômenos naturais e da complexidade de seu inter-relacionamento. De acordo com este autor, na área de recursos hídricos, a aleatoriedade dos eventos hidrológicos, a adoção de modelos imprecisos, as hipóteses simplificadoras, a relatividade dos princípios adotados e, ainda, a forte interconexão com componentes ambientais e sócio-econômicos extremamente variados, fazem com que a gestão hídrica, em todas as suas funções, atividades e instrumentos, conviva com uma vasta gama de incertezas, tanto endógenas quanto exógenas aos sistemas hídricos de que se ocupa.

Studart & Campos (2001) afirmam que as incertezas inerentes ao comportamento aleatório das vazões naturais consistem em uma das maiores dificuldades com que o processo de alocação de águas se defronta. Tais incertezas não podem ser reduzidas, mas podem ser estudadas através de metodologias apropriadas, agregando informação valiosa no planejamento dos recursos hídricos. Segundo estes autores, em uma modelagem matemática de sistemas hidrológicos, as incertezas podem ser geradas pelo desconhecimento do verdadeiro modelo que representa o processo, pela avaliação dos parâmetros do modelo, ou pelas características naturais dos processos.

As informações necessárias para uma tomada de decisão em gestão de recursos hídricos muitas vezes encontram-se incompletas, ausentes, ou com alto grau de incerteza. Além disso, nem sempre estão disponíveis modelos dos processos hidrológicos superficiais e subterrâneos calibrados para as regiões nas quais deseja-se realizar a gestão. Ou seja, a incerteza na Hidrologia é quase sempre um somatório de problemas causados pela deficiência da informação e pela complexidade natural da representação dos processos hidrológicos.

Considerando que os dados em recursos hídricos possuem na sua maioria algum grau de incerteza, e que, estes dados podem ser representados espacialmente, como se comportaria então, a questão da incerteza associada aos planos de informação gerados por inferência espacial? Quais as implicações inerentes à conversão de uma informação “estimada”, (situação muito comum em recursos hídricos), em planos de informação espaciais?

Nos últimos anos, muitas pesquisas têm sido conduzidas para melhorar a qualidade dos dados em um SIG, tendo como principal objetivo reduzir os desvios e a variância das medidas. No mundo real, a matemática precisa não consegue descrever os dados espaciais de maneira satisfatória. Quando nos referimos a uma temperatura quente ou fria, está introduzida nessas afirmações uma ambigüidade, pois não existem limiares estabelecidos para essas sensações, embora a escala de temperatura, por exemplo, de Celsius, seja universalmente aceita (Silva, 1999). O que este autor enfatiza é que os limites entre superfícies contínuas não ocorrem bruscamente na maioria das vezes. Ou seja, fenômenos como Topografia, Pluviometria, Pedologia, não poderiam, a priori, ser representados com limites muito bem definidos (um mapa de polígonos ou uma grade de pontos), a não ser que se considere de alguma forma a incerteza associada a esta representação.

O pesquisador do INPE (Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais) Gilberto Câmara, autor de diversos artigos, livros e palestras abordando a questão da incerteza no Geoprocessamento de informações, cita em várias ocasiões a obra do filósofo Karl Popper - “Sobre Nuvens e Relógios” – e faz uma comparação da abordagem deste texto clássico sobre o problema do conhecimento, com as informações de natureza espacial utilizadas nos sistemas de informação geográficas.

Na abordagem filosófica de Popper, existem duas grandes posturas do ser humano frente ao mundo: a *visão determinística* que considera que a natureza é composta de fenômenos perfeitamente mensuráveis (os relógios) e que o conhecimento consiste em sua descrição, preferencialmente na forma de leis, e a *abordagem estatística* que considera que muitos fenômenos naturais são cognoscíveis apenas de forma aproximada (as nuvens), e tudo o que podemos saber sobre eles é sua descrição em termos de distribuições de probabilidade. Câmara (2001) acrescenta que esta dicotomia entre a visão determinística e a estatística reflete-se diretamente na produção de medidas de qualidade para dados geográficos. A visão determinística (os relógios) supõe que é possível conhecer elementos do mundo de maneira precisa e que, a medida de qualidade de nossa informação será determinada pela melhor ou pior aproximação destes elementos em nossos produtos. Entretanto, considerando tipos de fenômenos geográficos, como poluição, temperatura e fertilidade do solo, que apresentam grande variabilidade intrínseca, a visão de “nuvens” é a abordagem mais adequada, o que implica em buscar uma caracterização estatística, e substituir o conceito de exatidão pelo de incerteza.

Mas esta incerteza não é tão fácil de ser estimada, pois, na maioria das vezes, encontram-se disponíveis apenas algumas poucas amostras de um único levantamento. Neste contexto o mesmo autor defende o uso da primeira lei da geografia: “todas as coisas se parecem, mas coisas mais próximas são mais parecidas que aquelas mais distantes”. A idéia aqui é que, para fenômenos contínuos no espaço, como altimetria e fertilidade de solo por exemplo, os vizinhos podem fornecer informação auxiliar importante sobre cada localização de estudo e sobre a incerteza associada. Esta concepção pode ser formalizada pelas técnicas da geoestatística, principalmente através da krigagem por indicação, técnicas estas, incorporadas à maioria dos SIGs. Em resumo, a idéia central de toda esta discussão é a seguinte: quando se lida com dados ambientais, como é o caso da maioria dos dados necessários para realizar a gestão de recursos hídricos em alguma porção do território, é fundamental dispor de critérios que permitam aferir a qualidade e confiabilidade dos dados em que se trabalha. Adicionalmente, quando se lida com fenômenos com variação contínua no espaço, é mais adequado modelar os dados geográficos como nuvens e não como relógios.

Na tomada de decisão em problemas relacionados com recursos hídricos, a incerteza será sempre uma variável a ser considerada, quer na fase de levantamento, ou no processamento das informações, ou em qualquer outra fase do processo decisório. Muitas são as dificuldades de obtenção de informação confiável nesta área de conhecimento, por este motivo, torna-se imprescindível o desenvolvimento de metodologias de tratamento, quantificação e qualificação da incerteza para agregar maior confiabilidade aos sistemas de apoio à decisão em recursos hídricos.

2.5. Áreas Costeiras Urbanizadas

*“Tendo a descoberta do Brasil sido intencional ou não o fato é que, ao desviar seu rumo bem mais para oeste do que o necessário para contornar a África, Cabral não havia aportado na Bahia por acaso. Ele alcançara a costa brasileira no seu trecho mais protuberante: aquele que se prolonga desde o cabo de São Roque (RN) até o sul da Bahia – e que, mais tarde, seria chamado de **Costa do Brasil.**”*

(Eduardo Bueno)

O Brasil é um país conhecido internacionalmente pelo seu extenso litoral. Historicamente pode-se afirmar que a necessidade de comunicação com os países colonizadores fez com que os primeiros aglomerados urbanos surgissem especialmente no litoral ou próximo a este.

“Os núcleos urbanos estabelecidos nos primeiros séculos da colonização brasileira situavam-se de modo predominante no litoral, por razões econômicas, administrativas e militares. Exceção fizeram apenas às vilas do planalto paulista. O sistema econômico ao qual a Colônia era vinculada, baseado na divisão internacional do trabalho, fazia com que os núcleos dependessem estreitamente das comunicações com a Metrópole. Era natural pois que se procurasse situá-los em posição de conexão com esquemas eficazes de comunicação e esta era garantida, de preferência, através de vias fluviais e marítimas, fosse para o escoamento dos produtos de exportação que constituíam a base econômica da vida colonial, fosse para a obtenção de produtos manufaturados”(Reis, 2000).

Segundo este autor durante o domínio espanhol (1580-1640), estabelecido o controle ibérico sobre todo o litoral, tornaram-se comuns as vilas e cidades com sítios escolhidos em terrenos planos ou quase planos, como Cabo Frio, João Pessoa, Ubatuba, Parati, etc. As motivações para o crescimento urbano em áreas costeiras parecem ter mudado mas o fato é que ainda há uma grande migração de pessoas para estas áreas seja por interesses econômicos (no caso de grandes cidades) ou interesses turísticos ou de lazer (no caso de pequenas cidades litorâneas que recebem periodicamente um grande número de visitantes ou moradores temporários).

2.5.1. Decisões de Gestão

No Nordeste brasileiro é possível identificar que as maiores cidades localizam-se no litoral e, além destas, são inúmeros os pequenos lugarejos que recebem um número muitas vezes superior ao da população local em determinadas épocas do ano, devido à grande procura por lazer nas praias nordestinas. Nestas áreas, o processo de urbanização muitas vezes ocorre sem a observância de restrições ambientais, como a preservação dos estuários ou da dinâmica marinha. De uma forma mais emergencial do que devidamente planejada, as autoridades procuram aumentar a oferta de água para atender à crescente demanda, ou a picos de demanda (no caso de áreas turísticas), como também, na maioria das vezes, procuram facilitar o escoamento das águas indesejáveis (esgotos,

águas pluviais, etc.) a qualquer custo, sem o menor planejamento. Braga e Ribeiro (2001) ressaltam que, de uma forma geral, inexistente a preocupação em se saber se a bacia hidrográfica está sendo impactada na sua função de produzir água e/ou se a água está sendo usada eficientemente pela sociedade.

Uma característica comum a estas áreas é o baixo gradiente topográfico que normalmente dificulta o escoamento superficial, o que, aliado ao afloramento do lençol freático em períodos chuvosos, e à crescente impermeabilização do solo devido à urbanização, pode provocar inundações.

Nesse sentido, as decisões a serem tomadas para uma efetiva gestão dos recursos hídricos em áreas costeiras devem considerar aspectos inerentes às águas superficiais e subterrâneas, pois, na maioria das vezes, as soluções para os problemas de planejamento urbano relacionados com este recurso natural – a água – dependerão da gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Uma exploração controlada e monitorada do aquífero freático através da captação de água por poços pode auxiliar, por exemplo, na drenagem superficial na medida em que o bombeamento em diferentes pontos pode ajudar a rebaixar o nível do lençol freático e controlar inundações que por vezes causam inúmeros problemas para a população em geral. Este manejo, porém, deve ser **gerenciado**, pois a exploração sem um controle rigoroso pode levar à escassez do recurso subterrâneo e ao aumento da intrusão salina.

2.5.2. Gestão Integrada: Águas Superficiais e Subterrâneas

Na maioria dos sistemas hidrológicos os componentes da água superficial e subterrânea estão intrinsecamente ligados, especialmente em áreas de baixo nível altimétrico como as áreas costeiras e em aquíferos rasos. Entretanto, a modelagem de água superficial e subterrânea é normalmente estudada de forma separada. Um número grande de trabalhos e pesquisas tem sido desenvolvido no sentido de integrar os componentes de fluxo superficial e subterrâneo no processo de modelagem (Geherels, 2001).

São várias as interligações entre água subterrânea e superficial. A água superficial pode transformar-se em água subterrânea através da infiltração da água de chuva, do excesso de água de irrigação, da percolação proveniente de rios, canais e lagos, como também através da recarga artificial. Por outro lado, água subterrânea pode transformar-se em água superficial através de descarga de base de rios, escoamento em fontes e drenagem agrícola. Um rio pode alimentar um aquífero subterrâneo ou ser alimentado por ele.

Na tentativa de facilitar o escoamento da águas indesejáveis em áreas urbanas vários rios têm sido retificados em forma de canais o que tem gerado um problema ambiental muito grave. Cabral et al. (2001) afirma que este procedimento além de causar uma série de prejuízos ao meio ambiente por descaracterizar totalmente o habitat natural, provoca o início de uma cadeia de problemas decorrentes, a exemplo, de favorecimento de ligações de esgotos clandestinos, ocupação das margens e das áreas de expansão de cheias e problemas de enchentes à jusante. Outro agravante é devido ao *isolamento da conexão hidráulica* entre o aquífero e o rio.

O manejo adequado da água, buscando reduzir o escoamento superficial por meio do aumento da infiltração de água no solo e, conseqüentemente, reabastecimento do lençol freático, representa uma prática fundamental para melhorar o aproveitamento das chuvas, minimizando os picos de vazões e reduzindo o déficit de água nos períodos de estiagem (Pruski, 2001), além de minimizar os custos da drenagem.

Carmon et al. (1997) denominam de “planejamento urbano sensível aos recursos hídricos” um planejamento que considere o manejo integrado das águas superficiais e subterrâneas em meio urbano. Segundo esses autores, o desenvolvimento urbano deve considerar os impactos esperados na quantidade e na qualidade da água, nas fontes hídricas (superficiais e subterrâneas) que abastecerão uma determinada área em processo de urbanização e/ou na água a ser utilizada por esta área urbana (mesmo que a fonte hídrica não se encontre geograficamente na área a ser urbanizada).

Nesta abordagem, Shamir e Carmon (1999) propõem maneiras de aumentar a infiltração do solo (recarga de aquíferos) visando uma redução do escoamento superficial, que se apresenta como um problema grave em áreas muito planas como as planícies costeiras. Além disso, algumas diretrizes são apontadas para promover a redução da poluição do escoamento pluvial que pode alimentar o aquífero.

Dentro destes novos paradigmas da gestão dos recursos hídricos, a Agenda 21 recomendou, para a década de 90 e anos futuros, o *manejo holístico* da água doce, tratada como um recurso finito e vulnerável, e a integração de planos e programas setoriais aos planos econômicos e sociais nacionais, integração esta, necessária, devido ao caráter multidisciplinar dos problemas de planejamento e gestão em recursos hídricos.

Abordagem Metodológica

3.1. Considerações Iniciais

“As soluções, eu já as possuo há muito tempo. Mas ainda não sei como cheguei a elas.”

(Carl Friedrich Gauss)

Diante de toda a discussão levantada acerca da utilização dos Sistemas de Informação Geográfica como Sistemas de Apoio à Decisão Espaciais e do referencial teórico a ela pertinente, apresentado no Capítulo 2 deste documento-tese, a abordagem metodológica desta pesquisa baseia-se, principalmente, na observação sistemática da forma de condução dos processos de análise e tomada de decisão de uma equipe de gestão de recursos hídricos. Esta equipe, formada por especialistas e técnicos é observada ao tomar decisões a respeito dos problemas relacionados com um caso específico e, para tanto, dentro desta abordagem, deve fazer uso de um SIG como sistema de apoio à decisão.

Esta observação sistemática parte de uma reunião de dados relevantes para a tomada de decisão, os quais são organizados de forma estruturada e, em seguida, apresentados para a equipe de técnicos e especialistas. Diante dos dados disponíveis são observadas, através de entrevistas informais, as alternativas de gestão sugeridas, bem como as necessidades (e/ou possibilidades) de inferência que estes profissionais realizam intuitivamente sobre os dados ausentes, a partir do conhecimento acumulado sobre a área e seus problemas de gestão.

O processo decisório é então sistematizado nas três fases: inteligência-projeto-escolha, adotando para tanto a caracterização de Simon (1960). Tendo como ponto de partida esta sistematização, todo o processo decisório é modelado de forma a estabelecer alternativas de gestão e possibilitar uma escolha da melhor (ou das melhores) alternativas a partir das preferências dos tomadores de decisão consultados.

O modelo conceitual é convertido em planos de informações espaciais os quais não só configuram uma representação espacial dos dados levantados (modelagem espacial), como também incorporam o conhecimento especializado da equipe de gestão na medida em que são representadas as inferências sobre dados ausentes e os julgamentos e preferências dos especialistas.

Na descrição do modelo espacial são utilizados alguns fluxogramas. O processo de representação do conhecimento adquirido junto aos especialistas em planos de informação espacial fica mais claro através da modelagem espacial e, por conseguinte, dos fluxogramas utilizados.

Esta prática possibilita também uma melhor sistematização das alternativas de gestão, originalmente propostas pelos especialistas de forma desestruturada, além de permitir a inclusão de novas alternativas que dificilmente seriam consideradas sem a visualização estruturada do problema como um todo. Para que o processo decisório seja sistematizado, na prática, nas três fases (inteligência-projeto-escolha), em um ambiente SIG todas as questões de representação e gerenciamento do conhecimento apontadas no Capítulo 2 devem ser consideradas.

Por fim, todo o conhecimento modelado deve ser implementado em um sistema de informações geográficas, bem como em qualquer outro módulo computacional adicional que tenha sido previsto na modelagem (gerenciadores de banco de dados, modelos matemáticos, etc). Os primeiros resultados desta implementação devem ser submetidos a uma análise de sensibilidade por parte dos especialistas, para que qualquer alteração conceitual ainda possa ser realizada. A obtenção de resultados que permitam um suporte à decisão em problemas dantes complexos de serem solucionados é o que pode ser considerado como produto final deste trabalho.

3.2. Etapas Metodológicas

*"Todos os erros humanos são impaciência, uma interrupção prematura de um trabalho metódico."
(William Shakespeare)*

* Apresentar o estado da arte dos Sistemas de Suporte à Decisão Espaciais, métodos e técnicas relacionados, principais aplicações e, principalmente, sua forte relação com as novas geotecnologias e com os sistemas de informação geográfica;

* Escolher e caracterizar uma área urbana costeira e seus problemas relacionados à gestão de recursos hídricos, reunindo o maior número de informações envolvidas de diferentes naturezas (técnicas, legais, sociais, físicas, hidrológicas, etc.) sobre a área em questão;

* Apresentar os dados coletados de forma estruturada para uma equipe de técnicos e especialistas e observar, através de entrevistas informais, as alternativas de gestão sugeridas diante dos dados disponíveis, bem como as necessidades (e/ou possibilidades) de inferência que estes profissionais realizam intuitivamente sobre os dados ausentes, a partir do conhecimento acumulado sobre a área e seus problemas de gestão;

* Consolidar as observações realizadas nas entrevistas de forma a sistematizar o processo decisório nas suas três fases - inteligência-projeto-escolha - para estruturar a modelagem e a representação em planos de informações espaciais;

* Converter todo o processo decisório em planos de informação espacial e modelar o conhecimento advindo dos especialistas e dos dados coletados de forma a estabelecer alternativas de gestão e possibilitar uma escolha da melhor (ou das melhores) alternativas a partir das preferências dos tomadores de decisão consultados;

* Implementar a modelagem realizada em um sistema de informações geográficas, explorando tanto seus recursos específicos de apoio à decisão (ex: análise multicriterial, lógica difusa, ponderação de critérios, etc.) como os recursos usuais de análise espacial (próprios do SIG) que podem em última instância apoiar a tomada de decisão (inferências espaciais, álgebra de mapas, simulações, visualização tridimensional, etc.);

* Identificar os possíveis problemas na implementação e os fatores que os causaram (ausência de informação, limitações da ferramenta escolhida, etc.), com vistas no desenvolvimento de soluções para os mesmos;

* Obter diretrizes para a gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas na área costeira escolhida, visando minimizar os impactos sociais, econômicos e ambientais causados pelos alagamentos frequentes, ao término da implementação do sistema.

3.3. Aquisição do Conhecimento

*"A informação que temos não é a que desejamos.
A informação que desejamos não é a que precisamos.
A informação que precisamos não está disponível."
(John Peers)*

A aquisição do conhecimento no âmbito desta pesquisa diz respeito a todas as atividades de levantamento, coleta, observação e formalização das informações pertinentes ao problema abordado. Nesta pesquisa, todos os dados utilizados, sejam eles em formato analógico, digital ou simplesmente observações empíricas obtidas em entrevistas ainda sem um formato predefinido, são consideradas partes de um todo, que é a base de conhecimento do sistema de apoio à decisão espacial, modelado e implementado em ambiente SIG.

3.3.1. Levantamento dos dados existentes

Todos os dados relevantes devem ser reunidos, independentes de seus formatos e tipologias. A informação a ser coletada depende diretamente do problema a ser solucionado ou das decisões a

que se pretende dar suporte com o SDSS. Nesta fase, órgãos e instituições públicos e privados podem ser consultados, bem como publicações que apresentem algum tipo de informação relevante.

Em seguida, todos os dados coletados devem ser estruturados segundo algum critério que pode ser desde sua tipologia, sua temática ou até sua fonte de obtenção. Pode lançar-se mão de mais de um critério para a estruturação, pois esta tem como objetivo apenas uma organização prévia das informações para facilitar a posterior apresentação aos especialistas.

3.3.2. Aquisição do Conhecimento Especializado

Como foi citado no Capítulo 2, para que um SIG seja considerado um SDSS, é necessário que permita a incorporação de preferências e julgamentos de especialistas para melhorar a eficiência na tomada de decisão. É esta capacidade de incorporação do conhecimento especializado do tomador (ou tomadores) de decisão que torna um SIG um Sistema de Apoio à Decisão.

Nesse contexto, todos os dados levantados devem ser apresentados aos técnicos especialistas que serão responsáveis pela incorporação de preferências e julgamentos à base de conhecimento do sistema. Diante da diversidade dos dados e, dependendo do conhecimento específico de cada especialista consultado, várias informações serão geradas e poderão ser adquiridas através de entrevistas, questionários, observações informais, gravações, etc.

Neste trabalho considera-se o método das observações informais em entrevistas periódicas aos especialistas. Os dados devem ser apresentados com uma organização prévia de forma a permitir que o especialista tenha uma visão geral do problema e dos dados disponíveis para apoiar decisões que auxiliem na solução deste problema.

Em um primeiro momento, nenhuma possibilidade deve ser induzida aos especialistas, mesmo que, de posse dos dados, tornem-se claras algumas soluções com a utilização do SIG. Os recursos de manipulação, gerenciamento, simulação, análises espaciais e visualização do SIG devem ser apresentados aos especialistas juntamente com os dados, pois o conhecimento a ser adquirido será um resultado das interações entre dados, possibilidades de uso destes dados e experiência dos especialistas.

Com base no conhecimento acumulado sobre a área abordada ou sobre o problema levantado, um especialista pode realizar inferências intuitivamente sobre os dados *ausentes*. Ou seja, além de interagir com os dados disponibilizados, pode-se inferir ou estimar algumas informações ausentes, porém importantes à tomada de decisão. Estas inferências, bem como todo o conhecimento gerado durante as entrevistas, devem ser cuidadosamente armazenadas, mesmo que de forma

desestruturada, para que seja possível, após uma reflexão apoiada na literatura científica pertinente ao tema, a formalização das mesmas em regras de decisão.

A Figura 9 representa os elementos inerentes ao processo de aquisição do conhecimento para a tomada de decisão utilizando SDSS. As decisões mesmo que ainda desestruturadas começam a ser definidas no decorrer destas interações entre especialistas/tomadores de decisão, dados disponíveis (ou não) e recursos/possibilidades do sistema.

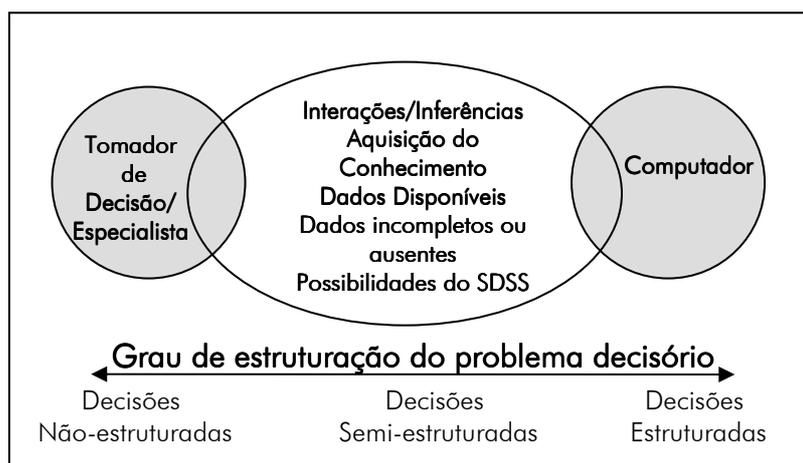


Figura 9 – Grau de estruturação de um problema decisório (baseado em Malczewski, 1997)

3.4. Sistematização do processo decisório

“O segredo de progredir é começar. O segredo de começar é dividir as tarefas árduas e complicadas em tarefas pequenas e fáceis de executar, e depois começar pela primeira.”
(Mark Twain)

Em um contexto de um Sistema de Apoio à Decisão, a sistematização do processo decisório em fases é necessária, pois dela parte toda a modelagem e implementação do sistema. Dentre as teorias conhecidas que versam sobre os processos de tomada de decisão e suas características, a teoria de Simon (1960) citada no Capítulo 2 é muito difundida e é a referência teórica adotada nesta pesquisa.

Durante a aquisição do conhecimento, a proposta deste trabalho é que sejam esgotadas as possibilidades de interações entre os dados, os tomadores de decisão, e as soluções apontadas, para que, por fim, seja realizada uma sistematização/formalização de todas as informações para a construção da base de conhecimento do SIG. É extremamente difícil conceber uma formalização do conhecimento adquirido sem considerar o tipo de sistema em que este será implementado. Por este motivo, mesmo que de forma conceitual, as possibilidades de utilização do SIG nas três fases do processo decisório (item 2.3 do Capítulo 2) já devem ser consideradas para nortear estas atividades

de formalização e estruturação do problema. É importante lembrar que é muito difícil para o ser humano concentrar-se só na fase de inteligência sem ao menos preliminarmente antecipar o modelo de solução do problema. Ao dar por terminada a fase de inteligência e passar para a fase de projeto é possível que se adquiram novas percepções do problema e se retorne à fase anterior. Este processo de “antecipação e retorno” pode se dar ao longo das três fases do processo e se, por um lado, pode tornar a procura mais longa e trabalhosa, provavelmente levará a resultados de melhor qualidade porque propicia melhor conhecimento do sistema.

*** Fase de Inteligência: Há um problema ou uma oportunidade para mudança?**

Mesmo que já exista inicialmente um reconhecimento de um problema (de outro modo não haveria a intenção de consulta a especialistas para implementação de um SDSS), a identificação de forma mais específica das decisões possíveis de serem tomadas e, conseqüentemente, dos problemas a serem solucionados, deve ocorrer na fase de aquisição do conhecimento.

Como foi citado no item 3.2.3., o método considerado neste trabalho pressupõe que nenhuma possibilidade é induzida aos especialistas e que os dados apresentados encontram-se semi-estruturados. Diante do exposto, problemas devem ser identificados como ponto de partida do processo de tomada de decisão. Decisões são necessárias quando um problema existe, quando alguma coisa está errada ou quando algo deve ser melhorado. Sendo assim, a fase de inteligência requer que o ambiente decisório seja completamente explorado para que se estabeleçam as condições necessárias para a tomada de decisão.

A identificação dos problemas pelos especialistas deve ser sintetizada de forma a permitir uma melhor abordagem pelo sistema de apoio à decisão. Se vários especialistas forem consultados, por exemplo, as interfaces e redundâncias entre os problemas identificados podem ser sintetizadas, formulando-se um único problema que possua as características identificadas pelos vários especialistas.

*** Fase de Projeto: Quais as alternativas?**

O modo de decidir de cada especialista consultado pode ser observado através das alternativas sugeridas para a solução dos problemas apontados pelos mesmos. Ou seja, já existe uma regra de decisão incorporada que precisa ser abstraída para facilitar a estruturação do processo decisório. Assim como na fase de inteligência, as alternativas sugeridas, resultantes das discussões e provocações das entrevistas, devem ser sintetizadas e formalizadas de modo a estabelecer um padrão de decisão.

É notório que mesmo diante da ausência e incerteza de algumas informações, os especialistas conseguem, baseados em sua experiência, enxergar possibilidades e dar suporte a decisões mais

acertadas. Capturar estas inferências sobre os dados ausentes e a capacidade de utilização otimizada dos dados existentes é a tarefa mais complexa desta fase de sistematização do conhecimento. Uma interpretação errada das regras de decisão observadas nas entrevistas pode levar à elaboração de alternativas completamente divergentes das sugeridas inicialmente. As alternativas similares podem ser agrupadas e dispostas de forma a facilitar sua implementação na base de conhecimento do sistema.

*** Fase de Escolha: Todas as alternativas propostas são viáveis? Qual a melhor?**

A avaliação das alternativas possíveis é a característica principal desta fase do processo de tomada de decisão. Cada alternativa é então avaliada e analisada com relação às demais através de uma regra de decisão específica. A “escolha” propriamente dita só deve ocorrer após a implementação do sistema, pois, os recursos analíticos do mesmo serão utilizados para este fim, mas, as preferências e julgamentos dos especialistas podem ser identificados ainda nesta fase anterior à implementação. Prioridades podem ser apontadas e alguma avaliação, mesmo que conceitual, das alternativas já pode ser realizada nesta fase.

Esta avaliação pode tornar necessário uma nova elaboração de alternativas, pois, após uma estruturação do conhecimento e considerando as possibilidades do SIG, os especialistas podem reconsiderar algumas posições. Este retorno a fases anteriores é muito comum em processos decisórios.

3.5. Modelagem Conceitual

*“A simplicidade é o que há de mais difícil no mundo: é o último resultado da experiência, a derradeira força do gênio.”
(G. Sand)*

Um modelo é uma simplificação da realidade. Pode ser uma teoria, uma lei, uma hipótese ou uma idéia estruturada. Também pode ser uma equação, uma função, uma relação ou síntese de dados. Pode incluir argumentos sobre o “Mundo Real” por meio de representações do espaço (a fim de se produzir modelos espaciais) ou no tempo (modelos temporais) e ainda uma combinação dos dois (modelos espacial-temporais) (Mendes & Cirilo, 2001). Na área de Banco de Dados, o termo *modelagem conceitual* é utilizado para denominar um modelo de representação de categorias do mundo real (entidades) e os relacionamentos existentes entre eles. Um modelo conceitual é considerado um modelo de alto nível, pois não está vinculado a nenhum software específico. Sua intenção é facilitar a real compreensão dos fatos através de uma representação semântica da realidade.

Em Sistemas de Informação Geográfica, toda informação é gerada a partir da modelagem conceitual dos dados (Figura 10). Um modelo pode simplificar sistemas complexos e facilitar seu entendimento. A modelagem conceitual dos dados em um SIG auxilia na tomada de decisão, pois funciona como um “filtro” que ajuda a extrair a informação relevante a partir de um grande e complexo volume de dados (Burrough et al., 1996).

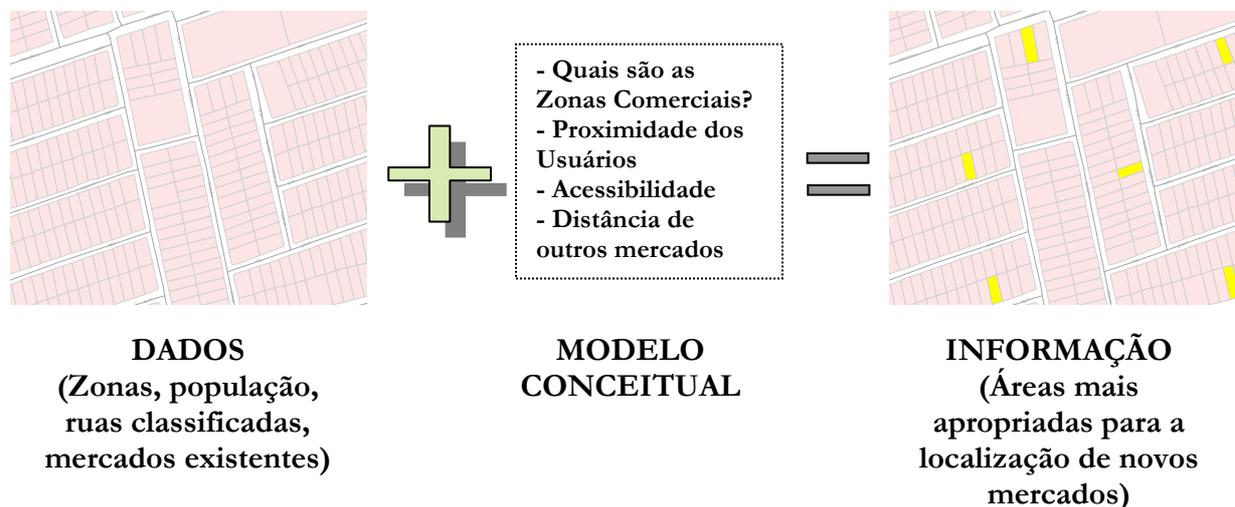


Figura 10 – Representação esquemática de uma informação gerada em um SIG (adaptado de Burrough et al., 1996)

Estes modelos podem ser desenvolvidos baseados no conhecimento de especialistas, ou em análises quantitativas (padrões pré-estabelecidos pela literatura ou por medições), ou ainda uma combinação de ambos (Green, 1999). O modelo conceitual desenvolvido neste trabalho deve representar de forma sistemática o conhecimento adquirido junto aos especialistas consultados. Ou seja, todos os problemas identificados, bem como as alternativas de decisão sugeridas, devem ser *estruturados* de forma a tornar claro o problema central abordado e suas possíveis soluções.

3.6. Modelagem Espacial

*“O espaço é um conjunto de objetos e um conjunto de ações”
(Milton Santos)*

Neste trabalho, propõe-se que todo o processo decisório seja representado por *planos de informação espacial* e que as alternativas para a tomada de decisão sejam obtidas a partir da modelagem destes planos. Ou seja, a maneira como estes planos serão combinados, operados, consultados, etc, estabelecida através da estruturação do problema na modelagem conceitual, definirá as possibilidades de decisão de todo o processo.

Para tratar de dados espacializados, ou representados por planos de informação espacial, vários modelos têm sido desenvolvidos com aplicações nas mais variadas áreas de conhecimento (Fotheringham & Wegener, 2001). O conceito de “modelagem espacial” adotado neste trabalho

baseia-se nos conceitos de “modelagem de adequação” (do inglês: “suitability modeling”) (ESRI, 1996; Burrough & McDonnell, 1998), “modelagem de adequação de uso do solo” (do inglês: “land-use suitability modeling”) (Brail & Klosterman, 2001; Longley et al., 1999) e “modelagem cartográfica” (do inglês: “cartographic modeling”) (Sendra, 1997; Malczewski, 2003).

Todos estes conceitos, amplamente difundidos na literatura científica da área de geoprocessamento (cuja tradução para a língua portuguesa nem sempre expressa de forma satisfatória seu real significado), dizem respeito às atividades de análise espacial em SIG e envolvem uma série de operações e relações entre os mapas, suas interações com os dados não espaciais (tabelas, textos, etc), dados intermediários derivados dos originais, enfim, todos os procedimentos necessários ao processo de modelagem espacial de informações. Neste sentido, a modelagem espacial aplicada nesta pesquisa se caracteriza pelos procedimentos metodológicos descritos a seguir.

3.6.1. Pré-processamento

O pré-processamento de todo o conhecimento a ser modelado no SIG é necessário devido à diversidade de tipologias e fontes de informações envolvidas em qualquer problema de gestão. Dados oriundos de diferentes tipos de mídia (ex: mapas digitalizados, mapas em papel, fotos scannerizadas, etc) devem ser compatibilizados e definidos seus formatos de armazenamento (raster ou vetor) para utilização em ambiente SIG. Além disso, todas as informações devem estar utilizando o mesmo sistema de referência espacial (ou georeferência), as mesmas unidades de medida, mesma escala, mesma resolução espacial (no caso de dados raster), etc. Quando da utilização de outros programas externamente ao SIG, como gerenciadores de banco de dados, programas de modelagem matemática ou estatística, faz-se necessária ainda nesta fase de pré-processamento a verificação de possibilidades de entrada/saída de dados entre estes programas e o SIG.

3.6.2. Desenvolvimento do Modelo

Para o desenvolvimento do modelo, são criados fluxogramas ou diagramas esquemáticos que representam de forma clara os planos de informação e as operações a serem realizadas entre eles na implementação. A modelagem, neste sentido, pode ser considerada uma simulação da implementação no SIG, com todas as operações que deverão ser efetuadas, bem como com a representação dos planos de informação que correspondam aos resultados esperados. Alguns autores se referem a esta representação gráfica como “modelo cartográfico” (Sendra, 1997; Sendra et al., 1994), pois geralmente se caracteriza por um fluxograma ou um esquema gráfico que representa *planos de informação*, que por assim dizer, são mapas em algum formato específico. Na modelagem espacial todas as possibilidades de solução do problema devem ser exploradas e

representadas de forma esquemática. Neste trabalho não é utilizado nenhum programa de geração automática de fluxogramas para SIG, tendo em vista a complexidade da conversão do conhecimento dos especialistas em planos de informação espaciais e a grande diversidade de dados envolvidos. Um exemplo deste tipo de modelagem é apresentado na Figura 11.

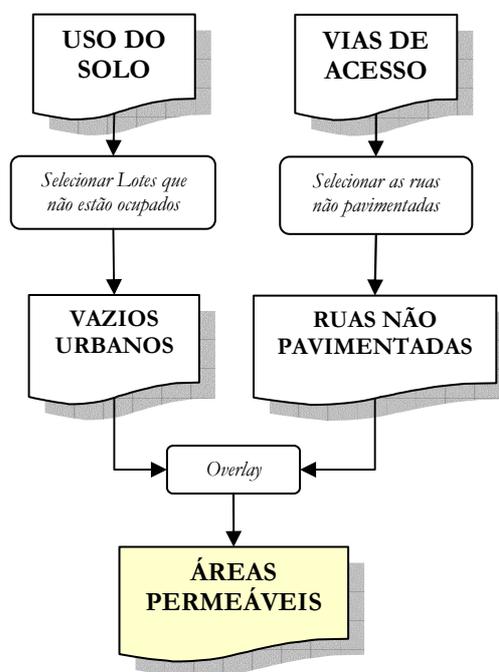


Figura 11 – Exemplo de modelagem espacial (ou cartográfica) para a obtenção de mapa de áreas permeáveis em uma área urbana.

Todas as inferências espaciais devem estar claramente “resolvidas”, mesmo que de forma esquemática, na modelagem espacial. Como foi citado no item 2.3.4., esta tese considera os modelos baseados em conhecimento, nos quais são necessárias as informações de entrada e uma metodologia que torne possível descobrir localizações ou zonas que satisfaçam a um conjunto de critérios pré-estabelecidos e gerem uma informação de saída.

Com relação à definição, elaboração e obtenção dos critérios para a análise, considera-se a abordagem de Eastman (1999), na qual, os *critérios* podem ser definidos como atributos mensuráveis das alternativas a serem consideradas, que podem ser combinados e avaliados na forma de uma regra de decisão. Os critérios podem ser classificados em *fatores e restrições*. *Fatores* são critérios que definem áreas ou alternativas em termos de uma medida contínua de aptidão (e/ou adequação), realçando ou diminuindo a importância de uma alternativa considerada para a avaliação. *Restrições* são critérios que limitam a análise, diferenciando as alternativas que são adequadas (que devem ser consideradas) das que não são adequadas (não devem ser consideradas) sob condição alguma.

Baseado nas informações dos especialistas consultados para o desenvolvimento desta pesquisa, os “mapas critérios” serão estabelecidos, diferenciando os critérios restritivos dos fatores

de adequação, sendo utilizadas as funções disponíveis no SIG (reclassificação, operadores algébricos, operadores fuzzy, operadores de distância, etc.) na padronização destes critérios para uma escala comum de utilização (0 a 1; 0 a 100; 0 a 255, etc.).

As inferências espaciais *Booleana*, *Média Ponderada* e a *Lógica Difusa*, definidas no item 2.3.4 são as mais utilizadas em modelos baseados em conhecimento e estes operadores usados isoladamente ou em conjunto configuram um conceito muito comum em geoprocessamento: o conceito de *álgebra de mapas*. Enquanto na álgebra convencional as variáveis são representadas por símbolos como “x” ou “y”, na álgebra de mapas os próprios mapas ou planos de informação representam as variáveis. Ou seja, um valor ou atributo associado a uma feição de mapa (no caso de dados vetoriais), ou a uma célula (no caso de dados raster) representa uma variável na álgebra de mapas. Alguns SIGs disponibilizam uma ferramenta similar a uma calculadora para realizar estas operações de álgebra de mapas (ArcView GIS, IDRISI, etc). Estas “calculadoras de mapas” permitem de forma interativa a construção de expressões numéricas que produzem um novo plano de informações.

A proposta metodológica deste trabalho é a utilização das funções já existentes na maioria dos SIGs, de forma sistemática, para promover efetivamente um ambiente de apoio à decisão. Estas funções, descritas no item 2.3.1, são incorporadas na modelagem espacial de acordo com os critérios estabelecidos para a análise. Além disso, um dos objetivos desta pesquisa é apoiar a tomada de decisão através de análises e inferências *espaciais* e, para tanto, faz-se necessário que todas as informações adquiridas (junto aos especialistas, coletadas em campo, fornecidas por instituições e órgãos de planejamento, retiradas da legislação, etc.) sejam representadas por *planos de informação espaciais*. É neste processo de representação que reside a maior complexidade da modelagem do problema decisório abordado por este trabalho.

3.6.3. Implementação

Após a representação de todo o processo decisório através de fluxogramas, a implementação pode ser caracterizada como a fase final da modelagem espacial. Neste momento, é de fundamental importância o domínio das ferramentas computacionais a serem utilizadas para evitar possíveis problemas na implementação.

Muito comumente, quando da obtenção dos primeiros planos de informações resultantes das inferências espaciais e da análise multicriterial estabelecida, alguns retornos aos especialistas podem ser necessários. Como já foi dito, é importante dentro desta abordagem a consideração das interações possíveis entre os recursos do ferramental computacional e os especialistas. Uma análise de sensibilidade dos resultados deve ser feita, o que pode levar a alguma alteração no processo de modelagem. Nesse sentido, a flexibilidade da ferramenta SIG utilizada tem grande relevância, pois

mesmo que as modificações necessárias digam respeito a algum critério utilizado no início do processo de modelagem, as alterações devem ser realizadas de forma simples e rápida, o que caracterizará o dinamismo e a agilidade da implementação. Em problemas ligados ao meio urbano, por exemplo, esta flexibilidade da ferramenta é imprescindível para que facilmente sejam gerados “cenários” de planejamento baseados na modelagem espacial realizada.

A implementação em um sistema de informações geográfica deve assim explorar tanto seus recursos específicos de apoio à decisão (ex: análise multicriterial, lógica difusa, ponderação de critérios, etc.), como os recursos usuais de análise espacial que podem apoiar a tomada de decisão (inferências espaciais, álgebra de mapas, simulações, visualização tridimensional, etc.). A Figura 12 é um exemplo simplificado de uma implementação de uma modelagem espacial.



Figura 12 – Exemplo da implementação (simplificado) da modelagem espacial da Figura 11.

Capítulo 4

Estudo de Caso

4.1. Ambientes Costeiros: Considerações Gerais

*“...Angra dos Reis e Ipanema, Iracema e Itamaracá,
Portão e Porto de Galinhas, braços abertos sempre a esperar...”
(Lulu Santos)*

As ações antrópicas nos espaços litorâneos têm gerado graves desequilíbrios ambientais ao longo dos anos. Estes ambientes se caracterizam por sua complexidade, por sofrerem influências diversas (geológicas, climáticas, fluviais, biológicas e oceanográficas, cósmicas, entre outros). É também nestas áreas litorâneas que as forças externas ao planeta são mais perceptíveis, a exemplo do movimento diário das marés ocasionado pelo posicionamento da lua.

No decorrer dos períodos Cretácio e Terciário, uma fase intensa de erosão no interior do Nordeste levou à deposição de sedimentos crono-correlatos, que constituíram as formações integrantes dos grupos Paraíba (Arenitos, Margas e Calcários) e Barreiras (Arenitos, Siltitos e Argilas), os quais se estendem desde os limites da faixa litorânea, prolongando-se pela plataforma continental atual. As variações do nível do mar durante o período geológico Quaternário, resultantes de glaciações intermitentes e de movimentos epirogenéticos, responderam pela erosão litorânea do grupo Barreiras, dando origem às planícies e tabuleiros litorâneos (Rufino, 2003).

As planícies e tabuleiros litorâneos correspondem a inúmeras porções do litoral brasileiro e quase sempre ocupam áreas muito pequenas (Figura 13). Geralmente localizam-se na foz de rios que deságuam no mar, especialmente daqueles de menor porte. Apresentam-se muito largas no litoral norte e quase desaparecem no litoral sudeste. Em trechos do litoral nordestino, essas pequenas planícies apresentam-se intercaladas, nas áreas de maior elevação, pela formação Barreiras, esta também de origem sedimentar. Estas áreas planas e baixas vêm sendo completamente ocupadas por edificações.

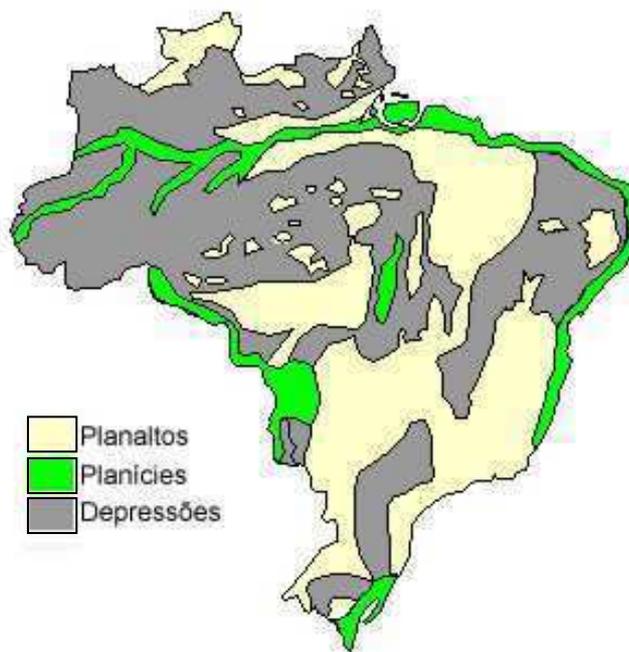


Figura 13 – Brasil: Mapa de Relevo Simplificado (Fonte: RS Virtual, 2004)

4.2. Áreas Costeiras na Cidade de João Pessoa

*“Somos a porta do sol, desse país tropical,
somos a mata verde, a esperança. Somos o sol do extremo oriental.”*
(Mestre Fuba)

4.2.1. Localização e Aspectos Físicos

A área abordada neste estudo compreende uma porção urbana inserida no litoral paraibano. O litoral da Paraíba apresenta uma extensão de 138 Km. Limita-se, ao sul, com o Estado de Pernambuco, pelo estuário do rio Goiano e, ao norte, com o Estado do Rio Grande do Norte, pelo estuário do rio Guajú. O município de João Pessoa localiza-se na zona costeira do Estado da Paraíba (Figura 14) e possui a particularidade de abrigar o ponto mais oriental das Américas.

A precipitação média anual da cidade de João Pessoa é de aproximadamente 1.700 mm e evaporação média anual em tanque classe A de 1.310 mm. Seu clima pode ser classificado como tropical úmido, apresentando verão seco, sendo a variação da temperatura média mensal do ar ao longo do ano praticamente desprezível. A temperatura média anual é de 26,1 °C. A sua área é de 210 Km², com população recenseada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2000 de 597.934 habitantes, representando 15,3% da população estadual. Constitui portanto a maior concentração populacional do Estado da Paraíba. O município apresenta um índice de urbanização bastante alto, não dispendo de zona rural. Os vazios urbanos correspondem praticamente a áreas de preservação (porções de mata atlântica, manguezais, restingas, espelhos d’água, etc.) e loteamentos ainda não ocupados (Silva et al., 2002).



Figura 14 – Localização da cidade de João Pessoa

O litoral de João Pessoa é extremamente recortado, formando enseadas protegidas por recifes e interrompido em alguns trechos pelos estuários dos rios e maceiós¹, onde ocorrem os mangues que estão sob permanente influência das marés, apresentando-se em alguns momentos como áreas emersas, na maré baixa, e em outros, submersas, na maré alta (Nóbrega, 2002). A cidade possui duas unidades de relevo predominantes, os Baixos Planaltos Costeiros (tabuleiros costeiros) e a Planície Costeira (Figura 15).

As regiões elevadas, correspondentes aos tabuleiros, dominam maiores extensões. São platôs sub-horizontais, com leve declividade no sentido do litoral. Apresentam-se em alguns setores drasticamente dissecados pelo ciclo erosivo, dando origem a vertentes íngremes e vales fortemente encaixados, com acentuado declive nas cabeceiras. Exemplos destes são os vales dos rios Mumbaba, Marés, Cabelo, Timbó, Jacarapé, Camaço e Tambaí, os vales dos riachos Tibiri, Camurupim, Sanhauá, Taquarituba, Mussuré e do Meio e os vales das cabeceiras dos rios Jaguaribe, Cuiá e Boa Água. Os tabuleiros conseguem, entretanto, chegar até a costa, formando aí as denominadas falésias, que atingem duas ou três dezenas de metros de altura. As regiões elevadas são constituídas pelos sedimentos da Formação Beberibe e do grupo Barreiras. Grande parte da cidade de João Pessoa, bem assim como seu distrito industrial, encontram-se assentes sobre tabuleiros.

Já as regiões deprimidas coincidem com as planícies de inundação de vales maiores, com as baixadas litorâneas, representando interrupções do relevo elevado e sendo constituídas pelos depósitos mais recentes (aluviões e depósitos praias). Os vales dos rios Gramame, Prazeres, Mangabeira, Cuiá, Sanhauá, Paroeira, Preto e baixo e médio cursos do rio Jaguaribe, todos na área da

¹ Lagoeiros, no litoral, formados pelas águas do mar nas grandes marés, e também pelas águas da chuva (Dicionário Aurélio, 1999)

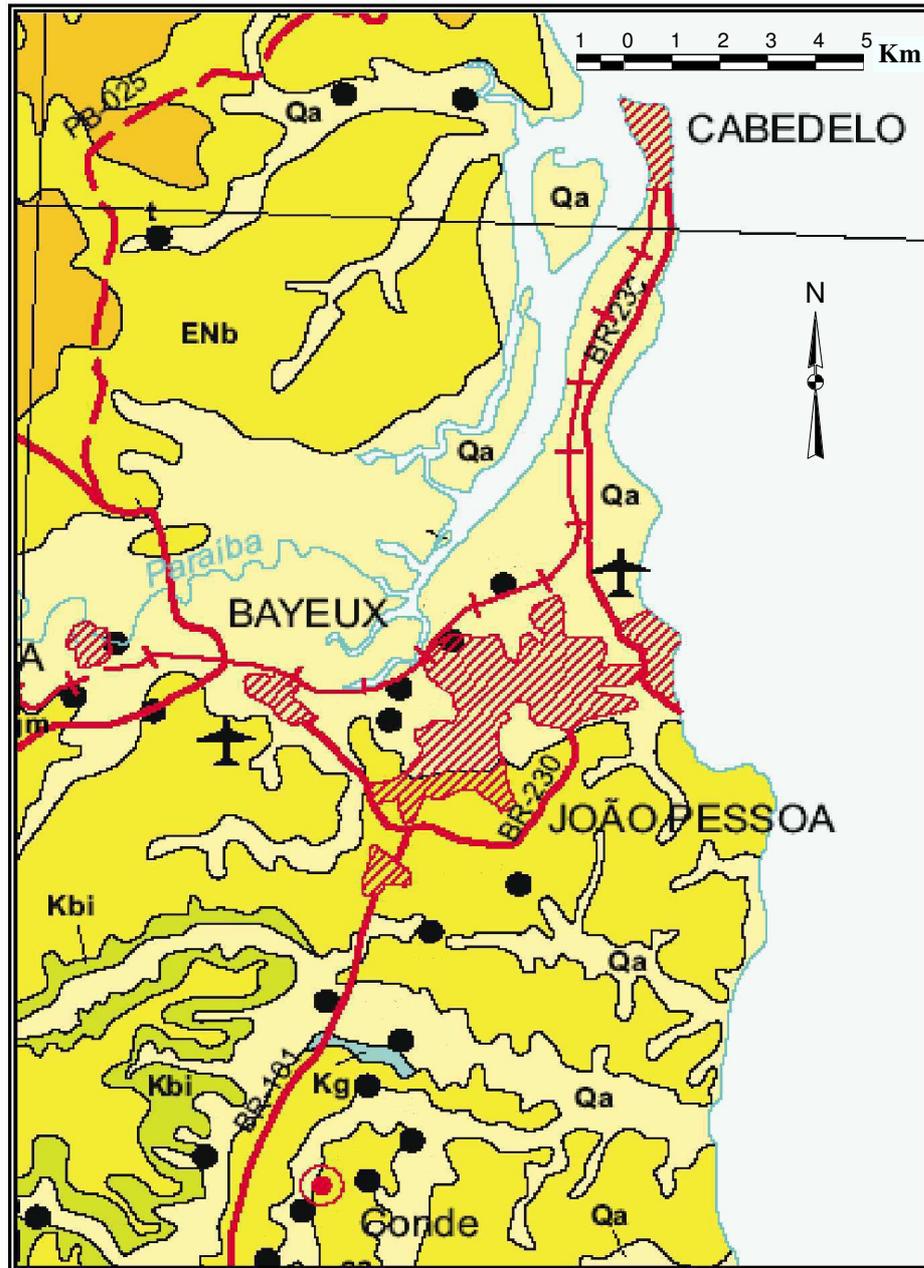
Grande João Pessoa, correspondem a regiões baixas. Igualmente relacionadas com estas últimas estão as baixadas litorâneas, que, do Cabo Branco para o sul, na mesma área, constituem apenas uma estreita franja costeira. Do Cabo Branco em direção ao norte esta franja vai paulatinamente se alargando, até integrar-se na restinga de Cabedelo, onde se localiza o município homônimo (Lummertz, 1977).



Figura 15 – Modelo digital de elevação da cidade de João Pessoa – PB (gerado a partir dos pontos cotados cedidos pela SEPLAN)

4.2.2. Hidrogeologia

Ao longo de toda a costa da capital paraibana ocorrem dois tipos essenciais de depósitos recentes: as coberturas e as aluviões. As coberturas são depósitos arenosos inconsolidados que capeiam ora a superfície dos sedimentos do Grupo Barreiras, ora a dos materiais da Formação Beberibe, ou ainda o topo das praias elevadas (Figura 16). O grupo Barreiras é um sistema livre de água doce superficial que tem profundidade que vai de um metro a algumas dezenas de metros de espessura. Nesta região costeira é comum a invasão da cunha de água salgada do oceano tornando a água salobra em determinados pontos. A Formação Beberibe é a mais importante da região. É um aquífero do tipo confinado que apresenta boa qualidade de suas águas e que tem sido explorado de forma crescente para fins de abastecimento humano na Grande João Pessoa.



IDADE (Ma)			CONTINENTE		BACIAS SEDIMENTARES	
CENOSÓICO	QUATERNÁRIO	HOLOCENO	Qa Aluviões e Sedimentos de Praia		Kg Formação Gramame	
		PLEISTOCENO	Ql Coberturas	Qe Coberturas aluvio-coluviais	Ki Vulcânica Félsica Itapororoca	Kbi Formação Beberibe/ Itamaracá
	NEÓGENO		ENb Grupo Barreiras	ENcn Formação Campos Novos		
		PALEÓGENO		ESm Formação Serra do Martins		

Figura 16 – Mapa geológico da Grande João Pessoa (adaptado de CPRM, 2002)

Quanto às aluviões, encontram-se ocupando extensões consideráveis em toda a faixa sedimentar costeira. Aparecem nos vales e terraços dos rios atuais, assim como nas praias e nos terraços costeiros. Nos vales dos rios, distribuem-se essencialmente nas proximidades de suas desembocaduras, onde se espalham em vastas superfícies formando as chamadas planícies costeiras de inundação. Em locais mais distantes da costa, predominam depósitos areno-argilosos de granulação em geral média a fina, ocasionalmente grosseira e até conglomerática (sedimentos fluviais). Nas zonas mais próximas da costa, os depósitos recebem a influência das marés, tornam-se mais siltico-argilosos, apresentam coloração cinza-escuro e constituem os sedimentos de mangue (OESA, 1976).

Na área da Grande João Pessoa, as aluviões aparecem em extensões consideráveis. Constituem toda a restinga de Cabedelo, bem como os vales dos rios de grande e médio porte que sulcam a área, a saber: o rio Paraíba ao norte e o rio Gramame ao sul (Figura 16). A espessura das aluviões pode atingir normalmente 15 a 20 metros, excepcionalmente mais, como acontece na porção nordeste da restinga de Cabedelo, onde chega a alcançar cerca de 75 metros. As aluviões constituem geralmente bons aquíferos livres. Sua permeabilidade está na razão inversa do conteúdo de silte mais argila. Encontram-se bem distribuídos na área da Grande João Pessoa ocupando notadamente os vales dos rios e riachos, bem como constituindo depósitos litorâneos de um modo geral. Ao longo dos anos, estes aquíferos têm sido explorados para o abastecimento de algumas pequenas indústrias, de incipientes sistemas de irrigação e abastecimentos domésticos em áreas localizadas, principalmente, na faixa litorânea. A taxa de infiltração nas aluviões é, em geral, bastante elevada, dada a boa permeabilidade que costumam apresentar tais sedimentos (Lummertz, 1977).

4.3. Água e Planejamento Urbano no Bairro do Bessa

*“Num recanto bonito do Brasil,
Sorri a minha terra amada
Onde o azul do céu é mais cor de anil
Onde o sol tão quente parece mais gentil”
(Genival Macedo)*

Na cidade de João Pessoa, a ocupação do solo e o tipo de organização do espaço urbano obedeceram às limitações impostas por dois fatores básicos - proximidade da faixa litorânea e proximidade do leito do rio Paraíba - além de outras condicionantes, como natureza do solo e topografia (Silveira, 1997). A rede de drenagem natural do município é formada por rios urbanos de pequeno porte e rios de médio porte que fazem o limite geográfico com os municípios vizinhos.

O rio Paraíba, com bacia hidrográfica de grande porte é o mais importante do município, pois drena cerca de 40% da sua área. O restante do município tem sua drenagem natural realizada pelos

rios Jaguaribe, Gramame, Cuiá, Riacho do Cabelo, Jacarapé e outros de pouca expressão (Figura 17). As margens destes rios vêm ao longo do tempo sofrendo aterros, as nascentes dos cursos d'água menores sendo ocupadas com construções e observa-se o crescimento de canalizações de córregos. Todas essas intervenções vêm sendo realizadas sem a adequada análise dos problemas envolvidos, análise esta que deveria exigir uma visão de macrodenagem e considerar a bacia hidrográfica como unidade de planejamento.

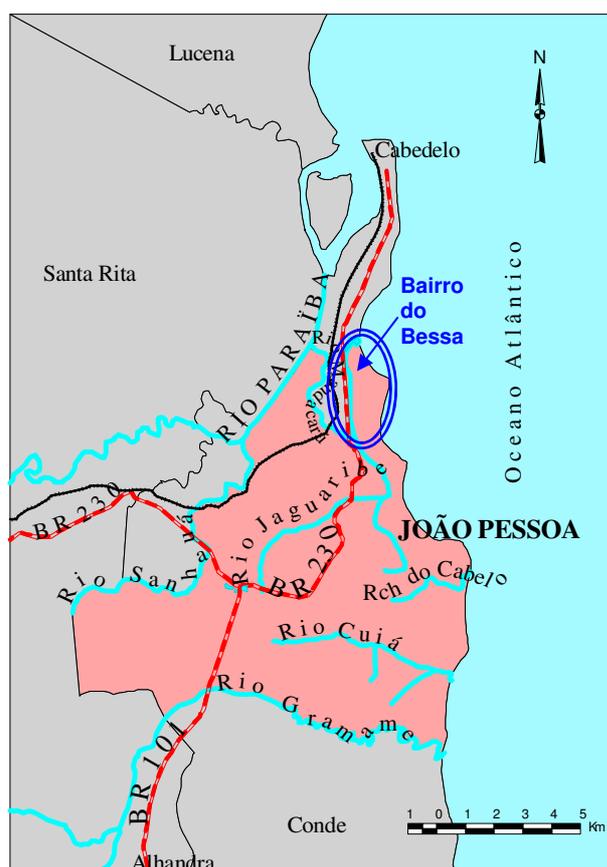


Figura 17 – Limite municipal de João Pessoa, localização do bairro do Bessa e principais cursos d'água (elaborado a partir de SEPLAN, 2000).

A cidade se desenvolve em dois planos principais, sendo a malha urbana mais antiga quase sempre nas cotas mais altas e a cidade “nova” em áreas mais baixas, incluindo-se aí a planície costeira. Setenta por cento da área da planície costeira tem sistema de esgotamento sanitário funcionando por bombeamento através de nove estações elevatórias colocadas no subsolo dos passeios públicos com extravasores direcionados para as galerias de águas pluviais. Estudos recentes realizados por Cabral et al. (2001) observaram que as bocas de lobo convencionais usadas nestas galerias pluviais favorecem a entrada de resíduos sólidos que, quando não as entopem, são conduzidos para os corpos receptores, contribuindo com a poluição dos cursos d'água e praias.

Os bairros escolhidos como estudo de caso para esta pesquisa caracterizam uma área urbanizada de planície costeira. Esta área tratada neste documento como “Bairro do Bessa”

(denominação antiga e mais conhecida pela população) abrange atualmente três bairros (Aeroclub, Bessa e Jardim Oceania), segundo a divisão de bairros oficial mais recente adotada pela prefeitura municipal. Possui extensão de 4,5 Km na direção Norte-Sul, variando na direção Leste-Oeste cerca de 1,8 km. Limita-se a Oeste com a BR-230, a Leste com o Oceano Atlântico e a Norte com a foz do antigo curso do rio Jaguaribe. Sua área é de 6,4 km² e seu perímetro de 11,9 km (Figura 18).

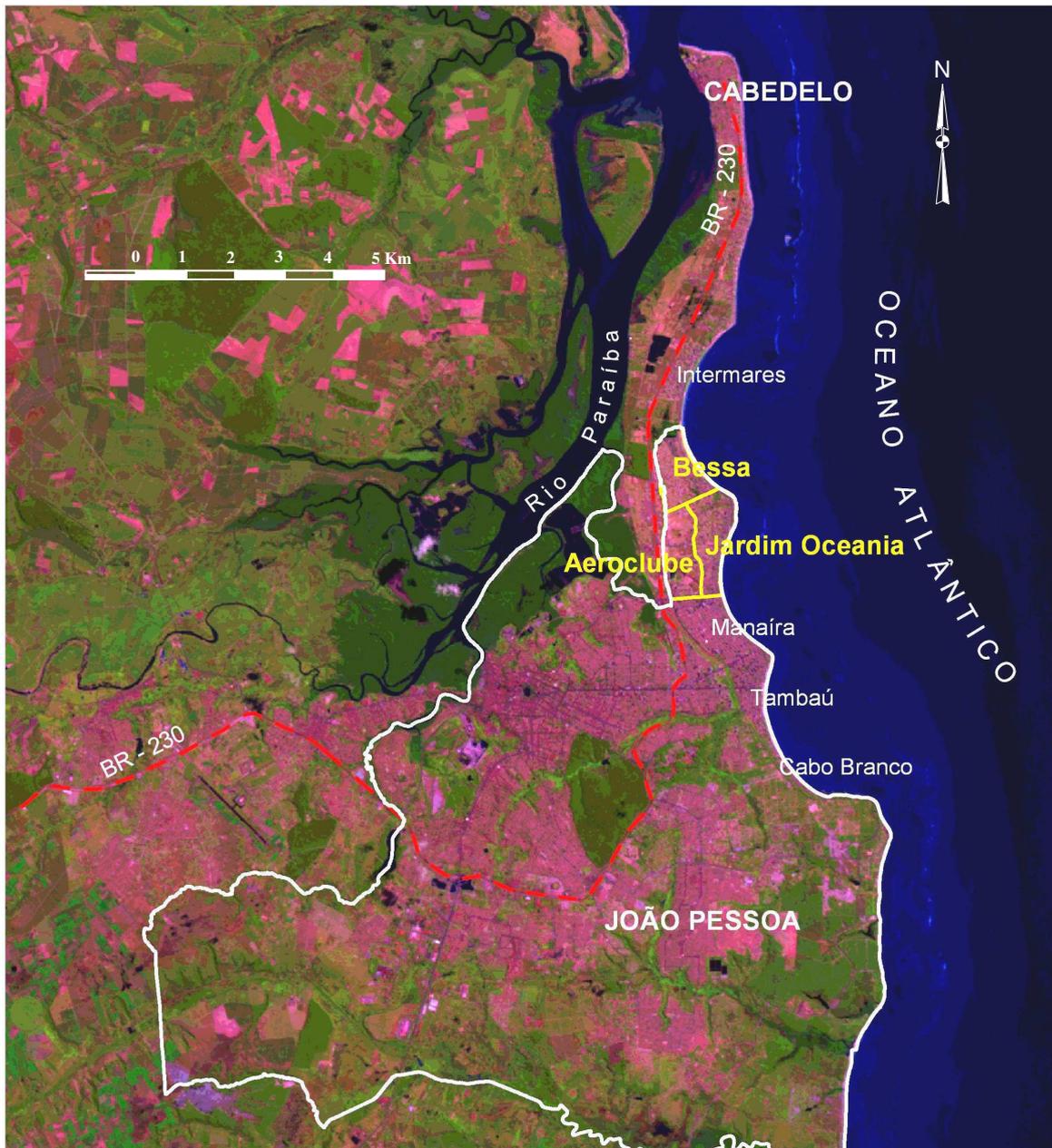


Figura 18 – Antigo bairro do Bessa (hoje: Bessa, Aeroclub, Jardim Oceania) e bairros adjacentes (composição colorida RGB das bandas 5,4,e 3. Imagem do dia 04/08/2001, sensor TM, satélite Landsat5)

4.3.1. Expansão Urbana

O desenho urbano de João Pessoa apresenta uma forma de “colcha de retalhos” devido às restrições do seu sítio geográfico e a algumas tendências de crescimento urbano verificadas no decorrer da história. Silveira (2001) afirma que o espaço da cidade de João Pessoa é marcado pelas características peculiares de sua paisagem natural, que modelam as suas transformações no espaço-tempo. Sendo assim, as transformações observadas no bairro do Bessa no decorrer das últimas três décadas têm uma forte relação com as características naturais desta área.

No mapa representado na Figura 19, pode-se observar alguns vetores de crescimento da ocupação do solo urbano em João Pessoa. O bairro do Bessa está localizado em um destes vetores - o vetor norte - que indica a consolidação da restinga entre João Pessoa e a sede do vizinho município de Cabedelo, com a ocupação da margem leste da rodovia BR-230. A localização e delimitação do bairro do Bessa estão indicadas na Figura 19.

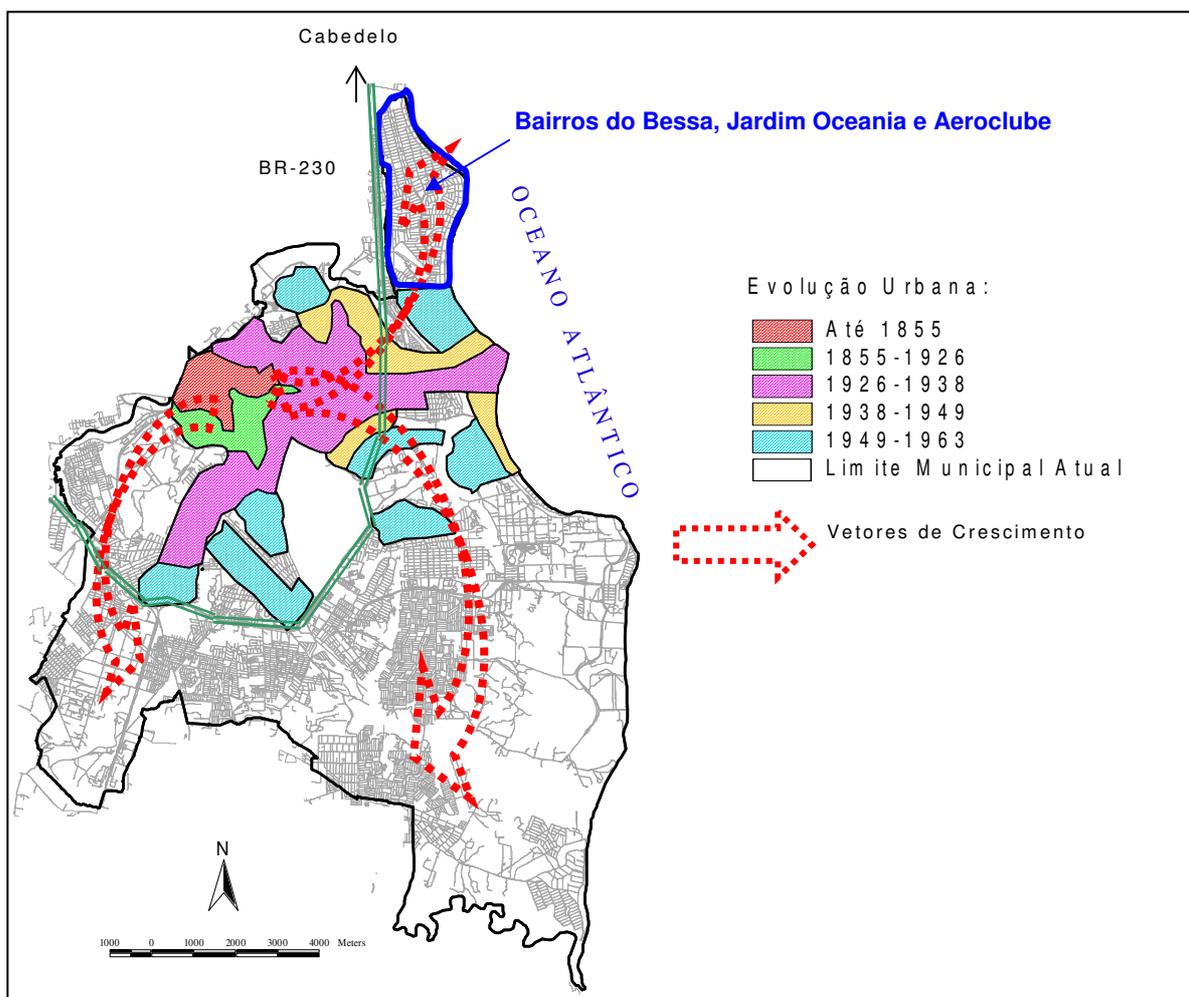


Figura 19 – Evolução urbana e vetores de crescimento na cidade de João Pessoa. Localização da área de estudo (adaptado de Silveira, 2001).

Segundo Rocha (1996), foi no período que se estende desde 1977 a meados da década de 80 que ocorreram as maiores modificações na paisagem da restinga. A intensificação do processo de loteamento resultou numa brutal redução da cobertura vegetal. Esta devastação foi motivada pela abertura, na área, de vinte e sete novos loteamentos, que datam do final da década de 70 e outros implantados no início da década de 80.

Paralelamente ao processo de loteamento, deu-se um segundo fato de igual importância no decorrer deste período: a efetivação e aceleração do processo de edificação na restinga, o que pode ser constatado pelo aumento surpreendente do número de “habite-se” liberados entre 1964 e 1995 (Tabela 4).

Tabela 4:

“Habite-se” liberados na área de restinga pertencente ao município de João Pessoa (adaptado de Rocha, 1996)

Anos	Número de “Habite-se” liberados
1964 a 1970	16
1971 a 1977	131
1978 a 1985	360
1986 a 1991	1724
1992 a 1995	1934

Este fato é atribuído, por um lado, ao crescimento do número das residências secundárias (residências utilizadas apenas em pequenos períodos do ano) por parte de uma parcela da população do Estado (vários destes imóveis pertencem a pessoas residentes em Campina Grande e outras cidades do interior da Paraíba), que a partir da década de 70 foi gradualmente adquirindo lotes nas praias do Bessa e em outras praias adjacentes ao norte (Formosa, Camboinha e Poço). Por outro lado, a partir da década de 80, principalmente na praia do Bessa, estas residências foram lentamente se transformando em moradas fixas, por representarem uma opção de moradia próxima ao litoral tanto para pessoas já residentes em João Pessoa, como para novos moradores da cidade (imigrantes do interior ou de outros estados).

Mesmo apresentando um aumento substancial, o processo de edificação no bairro limitou-se inicialmente às primeiras quadras da orla marítima. Segundo Rocha (1996), isto pode ser explicado pela dotação do bairro de alguns equipamentos urbanos tais como: pavimentação das principais ruas e construção de galerias pluviais. Um outro impulso para este processo verifica-se no final de 1991 com a implantação da rede de abastecimento d’água. A área do Bessa, particularmente, era abastecida pelo reservatório R-9 localizado em Tambaú (bairro próximo ao sul) e a expansão deste sistema de abastecimento acompanhou o ritmo do processo de ocupação a partir do bairro de Manaíra (bairro que se localiza entre o Bessa e Tambaú).

A acessibilidade à área também foi outro fator importante para este processo de urbanização. A facilidade oferecida pela via litorânea ao longo da faixa marítima ligando o bairro do Bessa aos bairros de Intermares e Poço (ao norte), cujo acesso até então era feito apenas pela BR-230 e por estradas secundárias, serviu de incentivo ao mercado imobiliário (Figura 19). A expansão urbana nesta área praticamente arrasou a vegetação de restinga existente (Figuras 20 e 21), o que vem provocando modificações geo-ambientais muito fortes, além de graves problemas de alagamentos, sobretudo durante a estação chuvosa.

4.3.2. Alagamentos: Problemas Frequentes

O bairro do Bessa, assim como outras áreas urbanas localizadas em planícies costeiras, padece ao longo do tempo de um problema que traz conseqüências ambientais, sociais e econômicas muito graves: os alagamentos. Periodicamente algumas ruas do bairro são completamente cobertas por água decorrente da deficiência da drenagem pluvial aliada aos afloramentos comuns do lençol freático. O Bessa se constitui na área mais larga da planície costeira de João Pessoa, é também início da restinga que forma o município de Cabedelo. Por ter quase dois quilômetros de largura e ser totalmente plana, a dificuldade para o esgotamento das águas pluviais como também das águas servidas são maiores que nos outros bairros da orla. Acrescenta-se a isto o fato de ser o lençol freático aflorante no verão e uma grande quantidade de água de chuva acumulada (que não consegue nem escoar nem infiltrar) no inverno.

Nóbrega (2002) faz uma análise de algumas das causas destes alagamentos e argumenta que os loteamentos no bairro do Bessa foram traçados e lançados no terreno natural com a premissa de aproveitamento máximo da área para a implantação de quadras e lotes. Durante o desenho destes loteamentos não foram considerados os pequenos córregos e lagoas sazonais, pois só acumulam água na época chuvosa. Quando os lotes foram vendidos, seus proprietários aterraram as pequenas depressões dos terrenos que são na verdade as lagoas e córregos citados, com a total desinformação do que representam no conjunto ambiental do loteamento. Conseqüentemente o fluxo natural de escoamento das águas de chuva foi interrompido, provocando alagamentos pós-ocupação. A Figura 20, um mosaico de fotografias aéreas de 1976, mostra o bairro do Bessa quando ainda apresentava suas características naturais com maceiós e cordões litorâneos ainda preservados, embora já seja possível observar o traçado das principais vias de acesso. As fotografias aéreas de 1998 (Figura 21) mostram a ocupação intensa do bairro do Bessa e comparando as duas fotografias, que apresentam um intervalo de tempo de vinte e dois anos, constata-se que houve uma ocupação maciça da planície, desrespeitando totalmente a drenagem natural do terreno.



Figura 20 – Mosaico de ortofotos do bairro do Bessa no início de sua expansão urbana (ano do levantamento aerofotogramétrico: 1976)



Figura 21 – Mosaico de ortofotos do bairro do Bessa com urbanização em fase de consolidação (ano do levantamento aerofotogramétrico: 1998)

No que diz respeito à gestão e distribuição de equipamentos urbanos na área, apenas no final da década de 90 (após todo o processo de expansão urbana consolidado) é que foram implantados os primeiros equipamentos urbanos: a pavimentação da principal via de acesso entre Bessa e Poço, a expansão do sistema de abastecimento d'água e o início da construção dos canais de drenagem do Bessa, como meio de solucionar os problemas freqüentes de alagamento na área (Rocha, 1996).

Estas intervenções ao passo que deram a infra-estrutura necessária para a urbanização, desencadearam outros problemas para os usuários e moradores do bairro. A pavimentação de algumas ruas, por exemplo, elevando o greide da via, deixou algumas residências em cotas mais baixas (Figura 22). Neste caso, houve a necessidade real de elevação do nível do pavimento porém, este fato ocasionou alguns problemas de drenagem nas áreas circunvizinhas como o represamento do escoamento superficial das águas de chuva, além de contribuir para diminuir a área de infiltração (Nóbrega, 2002). Além disso, o aumento da cota de piso de algumas ruas representou um ônus para os próprios moradores, proprietários ou locatários das residências atingidas.



Figura 22 - Represamento da drenagem natural pela implantação da rede viária. Junho/2000. Rua Ivanice M. Câmara/ Rua Lindolfo José C. Neves. Bessa. (Nóbrega, 2002).

Cavalheiro (1995), ao realizar uma análise das alterações ambientais causadas pela urbanização, destaca com relação aos aspectos hidrológicos que, enquanto dentro de um enfoque ecológico, o ideal é que as águas fluam o mais lentamente possível para que a produção de biomassa seja grande, nas cidades o ideal é que as águas cheguem com rapidez e também sejam esgotadas em grande velocidade. Freqüentemente, para solucionar problemas relacionados com inundações, as administrações municipais canalizam e/ou retificam os cursos d'água que cortam seus municípios e muitas vezes utilizam o local do antigo leito, ou as margens dos canais criados, para a implantação do sistema viário.

Se, por um lado, esta tentativa de facilitar o escoamento das águas indesejáveis em áreas urbanas impermeabilizando canais soluciona alguns problemas de alagamentos, por outro tem acarretado problemas graves de ordem ambiental e paisagística. Tucci (2001) afirma que este tipo de

solução segue a visão particular de um trecho da bacia, sem que as conseqüências sejam previstas para o restante da mesma ou dentro de diferentes horizontes de ocupação urbana. A canalização dos pontos críticos acaba apenas transferindo a inundação de um lugar para outro na bacia. Na área de estudo já se encontram canalizados alguns dos trechos de rios existentes (Figura 23). Estas obras de engenharia, do ponto de vista geo-ambiental, promoveram o desaparecimento de espécies da fauna e flora, presentes nas margens destes drenos, bem como já têm sido evidenciadas alterações significativas no fluxo subterrâneo.



Figura 23 - Trechos de rio canalizados no bairro do Bessa (Nóbrega, 2002)

Observando os elementos naturais da paisagem desta área, constata-se que existem estreitas relações entre água e relevo, solo, clima e vegetação. A cobertura vegetal interfere diretamente no comportamento da água, pois quanto mais importantes forem em sua fitomassa e densidade de cobertura, maior será a retenção de água no solo. A sua eliminação, quando da retirada das áreas de proteção dos mananciais para a canalização dos mesmos, faz com que a proteção que assegura ao solo, seja diminuída. A água infiltrada aumenta os níveis dos lençóis freáticos superficiais fazendo com que, muitas vezes aflorem. Alia-se a este fato a evaporação muito forte, que normalmente caracteriza as áreas litorâneas, e a pluviosidade relativamente elevada da área (aproximadamente 1.700 mm anuais) concentrada praticamente durante quatro meses do ano: abril, maio, junho e julho (70%). O relevo plano e a predominância de solos arenosos fazem com que esta área se torne susceptível a alagamentos devido ao nível do lençol freático, que é superficial e elevado (Rocha, 1996; Vieira et al., 2001). Este fato faz com que esta área esteja sujeita a alagamentos temporários, além de apresentar problemas localizados de recalque diferencial devido à baixa capacidade de suporte dos solos quando não submetidos a técnicas pertinentes de drenagem.

4.3.3. Drenagem Superficial e Águas Subterrâneas

Em regiões costeiras, como a analisada, um estudo prévio do comportamento do aquífero freático é de suma importância para fornecer subsídios para os projetos de drenagem superficial, podendo apontar qual a melhor configuração para o traçado dos canais de drenagem, levando em conta o grau de interferência que eles teriam.

No bairro do Bessa, o projeto de drenagem superficial não contemplou estudos hidrogeológicos, ou seja, não foi levado em conta, por exemplo, qual seria a influência da construção de canais de drenagem sobre o lençol freático e vice-versa. O órgão estadual responsável pelo controle ambiental, preocupado que tal construção pudesse causar uma elevação indesejável dos níveis do lençol freático, exigiu que estudos pertinentes fossem realizados. De acordo com o projeto, as águas coletadas são encaminhadas para os canais da seguinte forma (Figura 24): (i) Canal 1: tem o lançamento no Canal 4; (ii) Canal 2: tem o lançamento no Canal 4; (iii) Canal 3: tem o lançamento no Maceió do Clube dos Médicos; (iv) Canal 4: tem o lançamento dividido entre o rio Jaguaribe e a antiga foz do rio Jaguaribe em Intermares. O ponto de divisão fica próximo ao lançamento do Canal 2. As águas provenientes dos Canais 1 e 2 correm em direção ao rio Jaguaribe (Nóbrega, 2002).

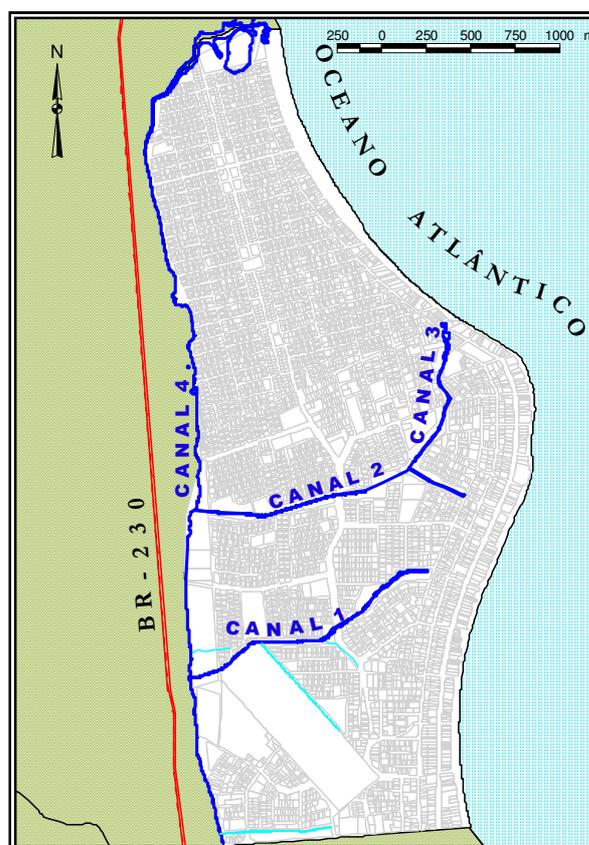


Figura 24 – Canais de macro-drenagem no bairro do Bessa.

Os estudos realizados (ATECEL/UFPB, 1999) incluíram a execução de sondagens para conhecimento da litologia do lençol freático e medições do nível do lençol em diferentes períodos de marés (as medições feitas pela manhã, com maré baixa, foram repetidas à tarde, com maré alta), além de testes de permeabilidade para a determinação dos parâmetros hidráulicos com vistas à quantificação do escoamento natural do lençol, etc.

Algumas conclusões foram obtidas a partir destes estudos (UFPB/ATECEL, 1999; Vieira et al., 2001): duas situações, extremas e opostas, poderiam ser esperadas da relação entre os canais e o lençol subterrâneo no bairro do Bessa. Uma delas seria o funcionamento do canal como uma barreira artificial interposta ao fluxo subterrâneo natural, provocando a elevação do nível freático, a qual teria início junto às paredes do canal e se propagaria por grande extensão do aquífero, alterando completamente o seu estado natural.

Neste caso, o canal, mesmo conduzindo as águas escoadas superficialmente, iria contribuir para a formação de zonas alagadas, com características pantanosas, devidas ao transbordamento do aquífero, supersaturado pela elevação do nível. Os picos de escoamento superficial seriam também exacerbados pela impossibilidade de infiltração da água de chuva no aquífero, cujo nível freático se encontrava previamente elevado; além de outras conseqüências ecológicas e econômicas desta situação.

A outra situação esperada de relação entre os canais e o aquífero seria oposta à anterior, isto é, que os canais funcionassem como drenos subterrâneos perfeitos, contribuindo para o rebaixamento do lençol em torno deles e, por extensão, em vasta área do aquífero. As conseqüências seriam também opostas à da situação anterior, indo favorecer a drenagem geral do bairro, melhorando as suas condições de habitabilidade. Por outro lado, a vegetação ciliar que dependia dos níveis altos do lençol próximo aos riachos e baixadas, tenderia a desaparecer.

No presente caso, conforme se depreende dos estudos realizados, *não acontecem quaisquer dessas situações extremas*. Os novos canais construídos, se não funcionam a contento como drenos subterrâneos, tampouco funcionam como barreiras impermeáveis. O fluxo subterrâneo pode alcançar o canal, em quantidades razoáveis, através das juntas de dilatação das paredes e do fundo dos canais. Na realidade, esta situação decorre do fato de que estes canais não foram dimensionados como drenos subterrâneos, sendo as suas juntas de dilatação planejadas para serem condutos de alívio de sub-pressão e o próprio canal como drenos das águas pluviais (Rufino et al., 2003).

Estes estudos concluíram, portanto, que na dependência de uma operação adequada e eficiente, esta função de dreno subterrâneo pode ser desempenhada pelos canais, com as conseqüências benéficas dela esperada. No entanto, a falta de manutenção regular dos canais pode levar às conseqüências opostas, já que, a longo prazo, haverá uma tendência natural a que as juntas

drenantes sejam obstruídas por cimentação, colmatação ou crescimento de vegetação. Pior do que isso, a obstrução do canal por entulhos, formando verdadeiros barramentos internos, eleva imediatamente o nível d'água no seu interior, podendo, em alguns trechos, inverter o fluxo, passando o canal a alimentar o aquífero.

Os estudos revelaram, ainda, que o aquífero é bastante sensível às intervenções antrópicas, o que pôde ser concluído pela extensão dos rebaixamentos do lençol freático, provocados por poços em operação em alguns pontos do bairro, visível em todos os mapas de redes de fluxo. Os poços chegam mesmo a interferir na função drenante de alguns dos canais construídos. Esta condição mostra-se particularmente vantajosa para a obtenção de rebaixamentos de níveis freáticos com o objetivo de melhorar as condições de drenagem no bairro.

Caso, futuramente, sejam constatadas tendências a elevações permanentes do lençol freático, a solução que se apresenta mais viável, segundo estes estudos, aponta para a construção de drenos coletores subterrâneos assentados transversalmente aos canais, a espaços e com dimensões devidamente projetados para os efeitos de rebaixamento desejados. Pode-se esperar ainda, que o próprio sistema de drenagem superficial e a impermeabilização de áreas de infiltração, resultante do acelerado processo de urbanização por que passa o bairro, contribuirão para reduzir as taxas de recarga do lençol, por precipitação pluviométrica, influenciando na drenagem subterrânea.

4.3.4. Aspectos Legais da Gestão no Bairro do Bessa

Para uma análise dos aspectos legais inerentes a um processo de gestão de recursos hídricos em meio urbano, torna-se necessário observar tanto as leis que regem o parcelamento urbano, bem como as leis que tratam especificamente dos aspectos ambientais e de recursos hídricos. Esta análise perpassa, portanto, pelas instâncias federal, estadual e municipal, já que, no decorrer das últimas décadas, foi repassada para os Estados e Municípios a competência legal de decidir sobre alguns aspectos ambientais e urbanísticos.

As questões que dizem respeito ao parcelamento urbano a nível federal são regidas pela Lei Nº 6.766 de 19/12/1979, que regulou de forma bastante abrangente os procedimentos inerentes ao parcelamento urbano, inclusive estabelecendo em seu Art 1º, Parágrafo Único, que os Estados, o Distrito Federal e os Municípios poderiam estabelecer normas complementares relativas ao parcelamento do solo municipal para adequar o previsto nesta Lei às peculiaridades regionais e locais.

Nesta lei, são estabelecidas algumas exigências básicas para a permissão de um parcelamento, exigências estas que parecem não terem sido observadas no caso do Bairro do Bessa (grifo nosso):

“Art 3º. Somente será admitido o parcelamento do solo para fins urbanos em zonas urbanas ou de expansão urbana, assim definidas por lei municipal.

Parágrafo único - **Não será permitido** o parcelamento do solo:

I - **em terrenos alagadiços e sujeitos a inundações, antes de tomadas as providências para assegurar o escoamento das águas;**

(...)

IV - **em terrenos onde as condições geológicas não aconselham a edificação;**

V - **em áreas de preservação ecológica ou naquelas onde a poluição impeça condições sanitárias suportáveis, até a sua correção.”**

A Lei N°4.771 de 15/09/1965, que instituiu o novo Código Florestal, quando trata da preservação das florestas, estabelece algumas diretrizes que se aplicam a processos de urbanização como o desta pesquisa. Esta lei recebeu uma nova redação através da Lei N° 7.803 de 18/07/1989, que assim estabelece (grifo nosso):

“Art. 1º A Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, passa a vigorar com as seguintes alterações:

I - o art. 2º passa a ter a seguinte redação:

“ Art. 2º Consideram-se de **preservação permanente**, pelo só efeito desta lei as florestas e demais formas de vegetação natural situadas:

a) ao longo dos rios ou de qualquer curso d'água desde o seu nível mais alto em faixa marginal cuja **largura mínima** seja:

1) de 30 (trinta) metros para os cursos d'água de menos de 10 (dez) metros de largura;

2) de 50 (cinquenta) metros para os cursos d'água que tenham de 10 (dez) a 50 (cinquenta) metros de largura;

3) de 100 (cem) metros para os cursos d'água que tenham de 50 (cinquenta) a 200 (duzentos) metros de largura;

4) de 200 (duzentos) metros para os cursos d'água que tenham de 200 (duzentos) a 600 (seiscentos) metros de largura;

5) de 500 (quinhentos) metros para os cursos d'água que tenham largura superior a 600 (seiscentos) metros;

(...)

c) nas nascentes, ainda que intermitentes e nos chamados "olhos d'água", qualquer que seja a sua situação topográfica, num raio mínimo de 50 (cinquenta) metros de largura;

(...)

f) **nas restingas, como fixadoras de dunas ou estabilizadoras de manguezais**

(...)

*Parágrafo único. No caso de áreas urbanas, assim entendidas as compreendidas nos perímetros urbanos definidos por lei municipal, e nas regiões metropolitanas e aglomerações urbanas, em todo o território abrangido, observar-se-á o disposto nos respectivos planos diretores e leis de uso do solo, **respeitados os princípios e limites** a que se refere este artigo."*

No que diz respeito à fiscalização, esta lei regulamenta que a União, diretamente, através do órgão executivo específico, ou em convênio com os Estados e Municípios, será responsável pela fiscalização da aplicação das normas do Código Florestal (Lei Nº 4.771), podendo, para tanto, criar os serviços indispensáveis e que, nas áreas urbanas, a fiscalização é da competência dos municípios, atuando a União *supletivamente*. (Lei Nº 7.803, Artigo 22, Parágrafo Único).

A legislação estadual só passa a incluir estas questões a partir de 1981 com a promulgação da Lei Estadual Nº 4.335, através da qual confere ao COPAM (Conselho de Proteção Ambiental, instituído através desta Lei) e à SUDEMA (Superintendência de Administração do Meio Ambiente) as tarefas preventivas, fiscalizadoras e repressivas na defesa dos recursos naturais. De acordo com esta Lei o COPAM, como órgão fiscalizador, e a SUDEMA, como o órgão executor, devem incentivar os municípios a adotar providências que racionalizem o desenvolvimento e a expansão urbana *dentro de limites que garantam a manutenção de condições ecológicas imprescindíveis* ao bem estar da população (Artigo 8º, § V).

Como foi citado anteriormente, a maior parte dos loteamentos na área de estudo foi aprovada e liberada no final da década de 70 e durante toda a década de 80. A Prefeitura de João Pessoa, visando coibir o uso indiscriminado do solo urbano, elaborou em 1974 o Código de Urbanismo Municipal. Este, por sua vez, foi regulamentado através da Lei Municipal Nº 2.102 de 31/12/1975 e define:

“Art. 93 - Qualquer curso d'água só poderá ser aterrado ou desviado após prévia autorização da Prefeitura, conforme parecer técnico do órgão competente.

Art. 94 - Nos fundos de vales ou talvegues e somente nestes localizados nas áreas urbana, de expansão urbana e de interesse urbano, é obrigatória a reserva de uma faixa de preservação natural, de

uso restrito ao previsto na folha 26 do Anexo 9, desta lei com o fim de manter o equilíbrio do meio ambiente e assegurar a implantação de equipamentos urbanos e vias de Circulação

§1º - Em cada fundo de vale ou talvegues, a largura mínima da faixa de preservação será determinada em função das dimensões necessárias a implantação dos equipamentos urbanos e vias de circulação, ou pela interseção da linha horizontal de cota igual a 10 metros em relação ao nível do leito do rio, riacho ou córrego, no ponto considerado.

§2º - Na fixação da largura mínima da faixa não edificável não devem ser computados os afastamentos das edificações.”

O Código de Urbanismo estabelece que para a aprovação de um plano de arruamento ou de um loteamento alguns serviços são considerados mínimos para o reconhecimento e a aceitação da urbanização do terreno pela Prefeitura. Dentre estes estão a execução da rede de drenagem de águas pluviais superficiais, inclusive meios fios e sarjetas, rede subterrânea de escoamento de águas pluviais, rede de esgotos sanitários, a critério do órgão concessionário deste serviço entre outros (Artigo 111).

Posteriormente este código sofreu modificações através da Lei 2.699 de 07/11/1979. Através do artigo 168, foi estabelecido um zoneamento de uso do solo e definido o uso permitido para cada zona, bem como índices e restrições de ocupação. Dentre estas, foram criadas quatro zonas especiais de preservação, dentre as quais a área correspondente ao antigo vale do rio Jaguaribe, incluindo o maceió formado na sua desembocadura e o manguezal situado na porção sudoeste da área, que ao longo dos anos tem sido alvo de constantes agressões.

O código municipal de urbanismo reforçou o que já estava estabelecido pela lei federal de parcelamento do solo (Lei nº 6.766/79), estabelecendo em seu artigo 91 que **não poderão** ser arruados ou loteados terrenos **pantanosos ou sujeitos a inundações** antes de executados por parte do interessado **os necessários serviços de aterro e drenagem**. Partindo do princípio de que este código já estava em vigor no final da década de 70 e parece não ter sido considerado para a liberação dos loteamentos na área do Bessa, pode-se afirmar que o interesse imobiliário prevaleceu em detrimento aos prejuízos que podem ser tão bem contabilizados nos dias atuais. Em 1990 foi promulgada a Lei Orgânica para o Município de João Pessoa, a qual exige em seus artigos 152 e 240 que a cidade seja dotada de um Plano Diretor. Segundo esta lei o Plano Diretor deve ser um documento de diretrizes que norteará o crescimento e o desenvolvimento da Cidade de João Pessoa até o ano 2010, passando por revisões periódicas a cada 5 (cinco) anos (artigo 240).

As Leis Complementares Nº3 (12/1992) e Nº4(04/1993) institucionalizaram o Plano Diretor da cidade de João Pessoa, o qual se caracteriza por um conjunto de diretrizes para o planejamento, o

controle e o uso do espaço urbano, o parcelamento e a ocupação do solo, a circulação, a proteção ao meio ambiente, as políticas de desenvolvimento econômico e social, bem como estabelece os instrumentos necessários à implementação dessas políticas.

Em seu artigo 4º, o Plano Diretor considera como exigência para o ordenamento e gestão do espaço urbano, conforme o disposto pelas Constituições Federal e do Estado e pela Lei Orgânica para o Município de João Pessoa, o cumprimento das seguintes condições fundamentais:

I - o uso e a ocupação do solo terão sua distribuição compatibilizada à infra-estrutura disponível, aos transportes e ao meio-ambiente, evitando o risco de ociosidade ou sobrecarga dos investimentos públicos;

II - a dinâmica de ocupação do solo será conduzida pela extensão e ampliação da capacidade da infra-estrutura;

III - a ocupação do sítio urbano será limitada por sua adequação às características físico-ambientais de forma a impedir a deterioração ou desequilíbrio do meio;

IV - a gestão urbana protegerá os lugares históricos, os monumentos naturais, as reservas biológicas e, especialmente, as fontes e mananciais de abastecimento de água da população;

V - as áreas deterioradas ou em processo de deterioração terão sua recuperação contemplada de forma a devolver-lhes as condições da habitabilidade ou de uso coletivo;”

Especificamente sobre a orla marítima, o Plano Diretor estabelece as restrições de ocupação quanto à altura máxima das edificações situadas em uma faixa de 500 metros ao longo da orla (artigo 25), além de atualizar o zoneamento estabelecido pelo Código de Urbanismo Municipal. Neste zoneamento são consideradas zonas especiais de preservação permanente as porções do território, localizadas tanto na área urbana como na área rural, nas quais o interesse social de preservação, manutenção e recuperação de características paisagísticas, ambientais, históricas e culturais, impõe normas específicas e diferenciadas para o uso e ocupação do solo (artigo 39). A área deste estudo enquadra-se em uma dessas zonas, conforme pode ser observado (grifo nosso):

I – O Centro Histórico da cidade;

*II - a Falésia do Cabo Branco, o Parque Arruda Câmara, a Mata do Buraquinho, a Mata do Cabo Branco, **os manguezais**, os mananciais de Marés-Mumbaba e de Gramame, o Altiplano do Cabo Branco, a Ponta e a Praia do Seixas e o Sítio da Gráfica;*

*III - **os vales dos rios Jaguaribe, Cuia, do Cabelo, Água Fria, Gramame, Sanhauá, Paraíba, Tambiá, Mandacaru, Timbó, Paratibe, Aratu e Mussuré**, na forma da Lei Federal e Estadual;*

(...)

VII - as áreas tombadas ou preservadas por legislação Municipal, Estadual ou Federal.”

A revisão do Plano Diretor do município encontra-se em fase de execução e dentre os módulos adicionais a serem elaborados está um que se preocupará exclusivamente com o planejamento e controle da drenagem. Como não se encontra disponível ainda sequer um texto provisório deste módulo, esta análise limitou-se apenas às diretrizes disponíveis na legislação citada e em vigor atualmente.

4.4. Sistema de Apoio à Decisão Espacial: uma Alternativa para a Gestão

“O rio atinge seus objetivos porque aprendeu a contornar obstáculos.”

(Lao-Tsé)

Os impactos do planejamento urbano nos recursos hídricos, e vice-versa, foram, nos itens anteriores, evidenciados e caracterizados no Bairro do Bessa, ou seja, o planejamento urbano, sua legislação disciplinadora, a real e efetiva evolução da ocupação urbana e as suas relações com vários aspectos dos recursos hídricos, como as águas subterrâneas, superficiais, sua drenagem e a intrusão salina.

A legislação vigente – através das Leis, Códigos e Planos citados – já fornece os critérios e diretrizes necessários para oferecer condições de habitabilidade em termos de infra-estrutura urbana, bem como prevê medidas de preservação que ainda podem ser adotadas para conservação das zonas especiais citadas (incluindo a área estudada). São necessários, para seu cumprimento efetivo, monitoramento e fiscalização integrados e dinâmicos dos processos urbanos, incluindo a dimensão ambiental e, nela, os recursos hídricos. Estas ações, para serem eficazes e viáveis, necessitam de ferramental técnico adequado, como sistemas integrados de informações e modelos numéricos de simulação dos processos urbanos e ambientais para geração de cenários de gestão (Rufino et al., 2003).

Nos meses de junho e julho de 2004, por exemplo, devido ao intenso volume de chuvas e aos problemas recorrentes que já foram descritos anteriormente, a população usuária deste bairro foi submetida a situações extremamente difíceis do ponto de vista da acessibilidade e do conforto do meio urbano. As fotografias apresentadas na Figura 25 são apenas uma amostra da necessidade de medidas urgentes de gestão nesta área.

Nesse sentido, algumas alternativas de gestão para o bairro do Bessa são apresentadas a seguir através da metodologia proposta nesta tese. Estas alternativas são sugeridas em um contexto de processos decisórios conduzidos por uma equipe técnica de gestão. Estes processos decisórios são representados e sistematizados através desta pesquisa em planos de informações espaciais. Para tanto, os especialistas consultados consideram não apenas aspectos hidrológicos como também aspectos de planejamento urbano, visando uma gestão integrada dos recursos naturais nesta área. Sendo assim dados cadastrais advindos da Secretaria de Planejamento da Prefeitura Municipal são cruzados e confrontados com as sondagens e estudos realizados pela UFPB/ATECEL, bem como com os dados que podem ser obtidos a partir da legislação em vigor, na tentativa de facilitar uma tomada de decisão de planejamento.



Figura 25 – Alagamentos recentes na área de estudo (julho/2004)

4.4.1. Aquisição do Conhecimento

Durante toda a caracterização do caso escolhido – o bairro do Bessa, área costeira do município de João Pessoa, - grande enfoque foi dado às inter-relações entre o planejamento urbano e a gestão de recursos hídricos em ambientes urbanos. Por este motivo, os dados considerados nesta pesquisa abrangem uma grande diversidade de informações, diversidade esta que pode ser verificada não só no conteúdo como também nas tipologias, fontes e formatos destas informações. Vários foram os órgãos gestores e instituições detentoras de informação consultadas. Dados cadastrais advindos da Secretaria de Planejamento da Prefeitura Municipal, mapas fornecidos pela Secretaria do Meio Ambiente do Estado, teses desenvolvidas com dados gerados sobre a área, informações disponíveis na Web, legislação vigente, dentre outros tipos de dados, foram, adicionados, cruzados e confrontados com os dados levantados em campo (sondagens e estudos realizados pela ATECEL/UFPB, 1999), na tentativa de facilitar uma tomada de decisão de planejamento.

Além disso, observa-se através de entrevistas o “modo de decidir” dos especialistas da equipe de gestão que, mesmo diante da ausência de informações, *tomam decisões* baseadas muitas vezes em experiências anteriores e no conhecimento acumulado. Este conhecimento altamente especializado incorporado aos dados disponíveis e estruturado em uma base de informações espaciais de um SIG deve permitir uma tomada de decisão mais confiável e com um menor grau de incerteza.

4.4.1.1. Levantamento dos dados existentes

* Mapa Urbano Digital da Prefeitura de João Pessoa (MURBD)

O núcleo de geoprocessamento da SEPLAN – Secretaria de Planejamento da Prefeitura Municipal de João Pessoa - desenvolve aplicações de cadastro e mapeamento sobre uma base digital georeferenciada do desenho urbano da cidade de João Pessoa. Esta base é uma restituição digital de um levantamento aerofotogramétrico realizado em 1998 e que, deste ano até os dias atuais, têm sido atualizado de acordo com as necessidades da prefeitura. A área de estudo, bem como quase toda a orla marítima, possui mapeamento até o nível da projeção horizontal das edificações (alguns bairros só foram mapeados até o nível da testada do lote e posteriormente receberam atualizações com um nível maior de detalhe). O cadastro multifinalitário da prefeitura (baseado no censo municipal realizado em 2000) já está associado a esta base, de forma que algumas análises espaciais já são realizadas de acordo com a demanda das instâncias gestoras. O potencial de utilização desta base é muito grande haja vista que muitas informações estratégicas para tomada de decisão na gestão do meio urbano encontram-se armazenadas. Os níveis (camadas) de informação do mapa digital urbano de João Pessoa utilizados nesta pesquisa foram:

- i. Uso do solo (residencial, comercial, vazios, etc.)
- ii. Classificação das atividades (posto de gasolina, supermercado, etc)
- iii. Ocupação urbana (ocupado, em construção, vazios, estacionamentos, etc.)
- iv. Quantidade de unidades habitacionais por lote
- v. Lotes com ligações de água
- vi. Número de pavimentos das edificações
- vii. Pavimentação das vias de acesso
- viii. Área edificada (projeção horizontal)
- ix. Áreas dos lotes
- x. Pontos cotados (Altimetria)
- xi. Hidrografia (incluindo os rios canalizados)

*** Mapas Estaduais**

Algumas informações foram obtidas junto a SEMARH – Secretaria do Meio Ambiente, Recursos Hídricos e Minerais do Estado da Paraíba - que complementam em alguns aspectos a base de informações do SIG. São estes:

- i. Mapa Político do Estado da Paraíba (limites municipais oficiais – IBGE)
- ii. Mapa Geológico do Estado da Paraíba (CPRM)
- iii. Mapa de Bacias Hidrográficas do Estado da Paraíba

*** Imagens de Satélite**

Para a observação da ocupação urbana na cidade de João Pessoa foram utilizadas bandas espectrais da cena 214-065, produzida pelo sensor TM, acoplado ao satélite americano LANDSAT (atualmente desativado), obtidas no dia 04/08/2001. Esta imagem, bastante recente, é uma das poucas imagens obtidas nos últimos anos, em que não há uma grande cobertura de nuvens sobre a área da cidade de João Pessoa.

* Cobertura aerofotogramétrica

A prefeitura de João Pessoa possui uma cobertura aerofotogramétrica de duas datas diferentes, com um intervalo de 22 anos entre elas. Dessa forma, é possível observar elementos de ocupação urbana e suas tendências de expansão. O mosaico destas fotografias foi realizado por Nóbrega (2002) e utilizado nesta pesquisa como mais uma fonte de informação para verificação de dados duvidosos do cadastro multifinalitário.

Fotografias aéreas de 1976:

VÔO – PMJP – Empresa TerraFoto – 962m nos dias 21.03.76 e 23.03.76 – E W

FAIXAS: 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18^A, 19^A, 20, 21 e 22.

Fotografias aéreas de 1998:

VÔO – PMJP – Empresa Aerofotogrametria Universal – 600m – janeiro a março de 1998.

FAIXAS: 15, 16, 16^a, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 e 25.

* Legislação Vigente

No item 4.3.4 pode ser observada uma descrição da legislação reguladora do uso do solo urbano para o caso Bessa. A partir de uma análise criteriosa desta legislação, algumas informações podem ser extraídas e tratadas de forma a permitir sua conversão em planos de informação espacial. Um exemplo típico é a elaboração de mapas de restrições de ocupação a partir das distâncias mínimas permitidas por lei. Os documentos legais consultados e analisados nesta pesquisa são abaixo listados. As referências completas destas leis podem ser encontradas na bibliografia apresentada ao final deste documento.

- i. Lei Federal N° 6.766 de 19/12/1979 (Parcelamento Urbano)
- ii. Lei Federal N°4.771 de 15/09/1965 (Novo Código Florestal)
- iii. Lei Estadual N° 4.335 de 16/12/1981
- iv. Lei Municipal N° 2.102, de 31/12/1975 (Código de Urbanismo de João Pessoa)
- v. Lei Municipal 2.699 de 07/11/1979 (Zoneamento do Solo)
- vi. Lei Orgânica para o Município de João Pessoa (1990)
- vii. Leis Complementares N°3 de 12/1992 e N°4 de 04/1993 (Plano Diretor)

* Teses/dissertações desenvolvidas envolvendo a área de estudo

Algumas das informações utilizadas tanto nas entrevistas com os especialistas, quanto no processamento dos dados, foram obtidas a partir de levantamentos pré-efetuados por outros pesquisadores e disponibilizados através de suas publicações referentes (Nóbrega, 2002; Oliveira 2001; Rocha, 1996). Estes documentos científicos, no caso desta pesquisa, serviram como um auxílio valioso ao trabalho de coleta de dados, haja vista que em cada um destes trabalhos podem ser encontradas caracterizações que englobam a área de estudo abordada nos seus mais diversos aspectos. As referências completas destes trabalhos podem ser encontradas na bibliografia apresentada ao final deste documento.

* Estudos realizados pela ATECEL/UFPB

A Universidade Federal da Paraíba realizou uma avaliação do comportamento do aquífero freático no bairro do Bessa e de sua influência sobre a drenagem superficial. Além dos relatórios finais com as conclusões obtidas, uma grande contribuição destes estudos foram as medições realizadas em campo que possibilitaram a calibração em laboratório de um modelo de fluxo subterrâneo – o MODFLOW – para a área do Bessa. Nesta pesquisa algumas interações são testadas entre este modelo de fluxo subterrâneo e o Sistema de Informação Geográfica. Além disso, são utilizadas várias informações disponibilizadas nos relatórios técnicos desta avaliação, bem como os mapas piezométricos gerados a partir dos dados levantados em campo:

- i. Relatórios Técnicos (parciais e final)
- ii. Mapas de Níveis Piezométricos
- iii. Modelo de Fluxo Subterrâneo Calibrado para a Área do Bessa

4.4.1.2. Aquisição do Conhecimento Especializado

Foram realizadas entrevistas informais com os especialistas que participaram da avaliação realizada pela ATECEL/UFPB citada anteriormente. Estes especialistas possuem um grande conhecimento da área do Bessa devido aos estudos que já realizaram na mesma. Dessa forma, foram apresentados os dados coletados por esta pesquisa para estes especialistas, bem como os dados possíveis de serem gerados a partir destes com os recursos disponíveis no SIG (por exemplo: o modelo numérico do terreno (MNT) pode ser gerado a partir dos pontos cotados, e o mapa de declividades pode ser gerado automaticamente a partir do MNT).

Durante as entrevistas observaram-se principalmente as possibilidades de gestão apontadas diante da exposição dos especialistas à grande quantidade de informações disponíveis, bem como a

percepção da ausência de algumas informações e suas inferências intuitivas quanto a estes dados ausentes considerados importantes. Alguns aspectos importantes observados nestas entrevistas:

- As alternativas de gestão apontadas foram diferentes para especialistas expostos à mesma quantidade e diversidade de informações;

- Mesmo com grande conhecimento acumulado sobre a área em questão, a inferência sobre dados ausentes foi estimulada pelas possibilidades de manipulação dos dados no ambiente computacional;

- Todo o processo decisório, a princípio, apresentou-se de forma desestruturada, tanto do ponto de vista da organização dos dados para o tomador de decisão (entrevistado), quanto do ponto de vista da “decisão” a ser tomada. Esta característica é comum em problemas não estruturados ou semi-estruturados como os problemas relacionados aos recursos hídricos.

4.4.2. Sistematização do processo decisório

No decorrer das entrevistas alguns problemas de gestão foram identificados e alternativas foram sugeridas de forma aleatória, sem a preocupação de uma sistematização das informações. Esta aparente “desorganização” das idéias simplesmente confirma que, de uma forma geral, o ser humano não segue rigorosamente as três fases (inteligência-projeto-escolha) do processo decisório definidas por Simon (1960) e já discutidas neste trabalho. Mas, no contexto de um Sistema de Apoio à Decisão esta sistematização em fases é necessária, pois dela parte toda a modelagem e implementação do sistema. Utilizando a teoria de Simon como referência e procurando esgotar as possibilidades de interações que ocorreram entre os dados, os tomadores de decisão, e as soluções apontadas, foi realizada uma formalização de todas as informações para a construção da base de conhecimento do SIG.

✳ Fase de Inteligência: Há um problema ou uma oportunidade para mudança?

Os problemas identificados pelos especialistas para o caso Bessa podem ser sintetizados na seguinte proposição:

“Promover a gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas no bairro do Bessa visando minimizar os impactos sociais, econômicos e ambientais causados pelos alagamentos frequentes.”

*** Fase de Projeto: Quais as alternativas?**

As alternativas sugeridas já incorporam as regras de decisão adotadas por cada especialista, mas a sistematização destas neste trabalho não segue necessariamente a seqüência em que foram proferidas. Também não há uma preocupação de diferenciar a origem de cada alternativa, ou seja, elas não estão organizadas por especialista e sim por especialidade. Alternativas e regras de decisão similares foram agrupadas e dispostas de forma a facilitar sua implementação na base de conhecimento do sistema. Esta sistematização foi a que demandou maior esforço metodológico. Para tanto, algumas consultas aos especialistas foram feitas durante este processo de sistematização para a verificação da fidelidade das informações neste novo formato. Uma interpretação errada das regras de decisão observadas nas entrevistas poderia levar à elaboração de alternativas completamente divergentes das sugeridas inicialmente.

A descrição detalhada das alternativas sugeridas é apresentada no modelo conceitual desenvolvido, mas de uma forma geral pode-se dizer que as possibilidades de gestão apontadas pelos especialistas após as entrevistas foram as seguintes:

Alternativa A:

Estabelecer um diagnóstico do ponto de vista da susceptibilidade a alagamentos, identificando “melhores” áreas para ocupação (áreas com menor susceptibilidade a alagamentos) e “avaliando” as áreas já ocupadas. Nesta avaliação vários critérios devem ser considerados (declividade, proximidade a corpos hídricos, etc.), os quais, são formulados e apresentados no modelo conceitual.

Alternativa B:

Estimular a utilização de água subterrânea do freático para minimizar o afloramento do lençol. Para tanto, foram sugeridas algumas simulações como a implantação de poços em algumas localizações (baseadas no conhecimento dos especialistas) e o bombeamento destes poços no período seco para a obtenção de um rebaixamento suficientemente grande para conter a recarga do período chuvoso.

Alternativa C:

Promover um bom funcionamento dos canais existentes para que eles continuem exercendo sua função drenante tanto da água superficial quanto subterrânea (fenômeno comprovado pelos estudos da ATECEL/UFPB, 1999). Para tanto considerar a proximidade dos canais para localizar poços segundo os critérios da alternativa A.

Alternativa D:

Com vistas à urbanização crescente do bairro, garantir uma quantidade mínima de áreas de recarga para promover o equilíbrio ambiental. Como resultado podem ser sugeridas áreas verdes, ou possíveis alternativas tecnológicas de impermeabilização que considerem o equilíbrio ambiental.

*** Fase de Escolha: Todas as alternativas propostas são viáveis? Qual(is) a melhor (ou as melhores)?**

Como foi descrito no Capítulo 3, a “escolha” propriamente dita ocorre após a implementação do sistema, pois, os recursos analíticos do mesmo devem ser utilizados para este fim, mas, as preferências e julgamentos dos especialistas podem ser identificados ainda nesta fase anterior à implementação. Algumas prioridades, por exemplo, foram apontadas e alguma avaliação, mesmo que conceitual, das alternativas de gestão já foi realizada anteriormente à implementação.

Prioridades de intervenção na área:

Alternativa A → Alternativa B → Alternativa C → Alternativa D

4.4.3. Modelagem Conceitual

É importante ressaltar que em Sistemas de Informação Geográfica, toda informação é gerada a partir da modelagem conceitual dos dados. Por este motivo, um processo de modelagem bem sucedido pode ser de grande importância na tomada de decisão, pois funcionará como um “filtro” que ajuda a extrair a informação relevante a partir de um grande e complexo volume de dados.

Para a estruturação do problema decisório levantado, as sugestões apontadas pela equipe de gestão foram subdivididas em quatro itens, os quais, foram denominados de alternativas. Cabe ressaltar que o termo “alternativa” adotado não implica em exclusão de uma em detrimento das outras, pelo contrário, a possibilidade das quatro alternativas serem implementadas ao mesmo tempo também é considerada. Tanto no desenvolvimento do modelo (item 4.4.4.2), quanto na apresentação e análise dos resultados (Capítulo 5) cada uma destas alternativas é descrita de forma detalhada e alguns dos aspectos técnicos considerados são melhor esclarecidos e justificados.

ALTERNATIVA A - Diagnóstico Inicial: Identificar “melhores” áreas para ocupação e “avaliar” as áreas já ocupadas do ponto vista da susceptibilidade a alagamentos.

A.1. *Dentre os lotes já ocupados, identificar as áreas mais susceptíveis a alagamentos:*

- *restrições: áreas ocupadas (inclusive as construções em andamento) em ruas não pavimentadas (maior possibilidade de infiltração de água de chuva e de afloramentos do lençol)*

- *Critérios: áreas mais rasas, proximidade a corpos hídricos, declividades muito baixas*

A.2. *Avaliar o risco de “ilhas”: lotes, ocupados ou não, cercados por áreas muito “rasas”;*

A.3. *Estabelecer restrições de ocupação baseadas na legislação vigente: distâncias mínimas previstas e áreas de preservação permanente;*

A.4. *Dentre os lotes não ocupados, identificar as melhores áreas considerando todos os critérios anteriores:*

- *restrições: áreas vazias (que ainda podem ser ocupadas) e permitidas por lei e que não são “ilhas”;*

- *critérios: proximidade a corpos hídricos, distância de áreas alagáveis, declividade; profundidade do aquífero, proximidade a vias pavimentadas, etc;*

ALTERNATIVA B - Rebaixamento do lençol para evitar o extravasamento

B.1. *Simular a existência de poços nas seguintes localizações:*

- *Edifícios com mais de 20 unidades habitacionais;*

- *Igrejas, praças, postos de lavagem de automóveis;*

- *Granjas e Mansões (dado ausente - inferir pela área e tipo de ocupação):*

○ *Ocupação residencial, tipo “casa” (unifamiliar);*

○ *Lotes com mais de 1.000 m²;*

○ *relação área do lote/ área edificada ≥ 7 m;*

- *Possíveis Praças (dado ausente – inferir pela área e ocupação)*

○ *Lotes com mais de 2.000 m²;*

○ *“Sem Ocupação”;*

○ *Distantes mais de 200 m de outras praças existentes;*

B.2. *Escolher “preferencialmente” o bombeamento de poços nas áreas onde o nível do aquífero é mais raso no período mais seco (profundidades ≤ 3 m);*

B.3. Simular a existência de poço nos locais de afloramento mais freqüentes:

- Simular uma recarga uniforme de 100 mm em todo o aquífero e verificar os locais de afloramento;

- Repetir a simulação anterior aumentando para 200, 300 e 400 mm a recarga e verificar novos pontos de afloramento;

B.4. Nas proximidades dos pontos de afloramento identificados localizar os possíveis poços dando prioridade a:

- Locais próximos que possuam edifícios;

- Locais próximos que possuam vazios urbanos (sugerir uso: praça, lava-jatos);

B.5. Rebaixar suficientemente no período seco para não ser necessário aumentar o bombeamento no período chuvoso;

B.6. Simular o bombeamento dos poços:

- Com a mesma vazão;

- Com vazões diferenciadas pelo uso ou localização;

B.7. Limitar a análise baseada na intrusão salina (nas simulações observar quando o nível do aquífero se apresentar muito baixo, próximo da linha de costa).

ALTERNATIVA C - Promover um bom funcionamento dos canais para permitir uma drenagem eficiente

C.1. Simular a existência de poços nas localizações apontadas pela alternativa A considerando a proximidade dos canais (todos os possíveis poços a uma faixa de 200 metros dos quatro canais de drenagem);

C.2. Simular o funcionamento dos canais como drenos subterrâneos considerando um funcionamento ótimo (sem problemas de limpeza/obstrução);

C.3. Limitar a análise baseada na intrusão salina (nas simulações observar quando o nível do aquífero se apresentar muito baixo, próximo da linha de costa).

ALTERNATIVA D - Garantir uma quantidade mínima de áreas de recarga para o equilíbrio do aquífero

D.1. Identificar profundidade do aquífero após simulação;

D.2. Determinar através de características como permeabilidade do solo, declividade e precipitação as áreas mais indicadas para recarga do aquífero:

Recarga = declividade + precipitação + permeabilidade + profundidade do aquífero

Considerando as seguintes funções de adequação:

-Declividade: quanto menor → mais adequado

-Precipitação: quanto maior → mais adequado

-Profundidade: quanto mais raso → mais adequado

-Permeabilidade: critério restritivo → analisar apenas nas áreas permeáveis (áreas já edificadas ou impermeabilizadas não poderão ser demolidas)

D.3. Apontar possibilidade e/ou viabilidade de áreas verdes para servirem de áreas de recarga, através de funções de adequação às seguintes hipóteses formuladas:

- Área: quanto maior → mais adequado (mais fácil a implantação de uma praça, por exemplo);

- Proximidade às residências: quanto mais próximo às unidades residenciais → mais viável a implantação de uma praça;

- Distância de outras praças: quanto mais distante → mais adequado (novas praças não devem ser implantadas muito próximas de praças existentes, para que o bairro inteiro seja bem servido deste tipo de equipamento);

- Recarga: critério restritivo → analisar apenas nas áreas apontadas pela análise realizada no item 2.

4.4.4. Modelagem Espacial

4.4.4.1. Pré-processamento

Antes de dar início ao processo de modelagem espacial propriamente dito, são realizados alguns procedimentos que configuram um pré-processamento de todas as informações. Estes procedimentos são descritos a seguir.

✱ Escolha do Sistema de Informação Geográfica

Todos os conceitos e informações apresentados nesta tese, dizem respeito a *qualquer* Sistema de Informação Geográfica, entretanto, para efeito de uma implementação, torna-se necessária a escolha do ambiente computacional a ser utilizado. A modelagem conceitual determina, de certa forma, os recursos computacionais que serão necessários para sua implementação.

Nesse sentido, a família de programas da ESRI (Environmental Systems Research Institute) caracterizada pelo software ArcView na sua versão 3.2 e seus módulos adicionais (extensões) Spatial Analyst e 3D Analyst foi escolhida para o desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Decisão Espacial. O Arcview é considerado um “desktop GIS” por ser um programa desenvolvido para computadores desktop. A configuração utilizada foi um computador com processador Pentium 4 de 1.50 GHz de frequência e 256 Mb de memória RAM².

O ArcView no seu pacote básico é considerado um “SIG vetorial” e apresenta um excelente desempenho quando do tratamento de informações em formato vetorial. O Spatial Analyst na sua versão 2.0 é a extensão do ArcView que o habilita como “SIG raster” e disponibiliza as funções específicas para tratamento de planos de informações em formato raster (grades regulares). O 3D Analyst é a extensão do ArcView que realiza análises espaciais tridimensionais e geração de grades irregulares (TIN – Triangular Iregular Network).

✱ Escolha do Modelo de Fluxo Subterrâneo

Para simular algumas das alternativas sugeridas pelos especialistas foram necessárias algumas operações entre o SIG escolhido e um pacote computacional para modelagem de fluxo subterrâneo. O fluxo de águas subterrâneas é governado por equações diferenciais parciais não lineares. Os modelos numéricos são baseados na substituição de uma equação diferencial parcial por uma equivalente de diferenças finitas, que é resolvida por cálculos aritméticos repetidos, processo conhecido como interação.

O processo numérico consiste em sobrepor ao aquífero uma malha com limites conhecidos. Para iniciar o cálculo assumem-se para todas as células da malha, cargas estimadas e, a partir destas, as cargas são calculadas de maneira sistemática. Após obter uma carga calculada para cada ponto da malha, são feitas estimativas revistas de cargas, processo repetido para todo aquífero. Cada série sucessiva de cálculos reduz a diferença entre cada carga estimada e calculada. Finalmente, quando as diferenças tornam-se desprezíveis, os valores resultantes representam as cargas piezométricas desejadas sobre o aquífero (Marques, 2004).

² Random Access Memory

Para este processamento foi utilizado o programa PMWIN (Processing Modflow For Windows – Chiang et al., 1998) na sua versão 5.0. Programas como este permitem a previsão do comportamento do aquífero sob variadas situações de exploração. Este modelo já havia sido *calibrado*³ para a área do Bessa quando da realização dos estudos da ATECEL/UFPB (1999) o que justifica sua escolha neste trabalho.

* Tratamento inicial dos dados

A partir da modelagem conceitual, foram definidos *quais* os dados que realmente seriam necessários para a modelagem espacial. Como foi apresentado no item 4.4.1.1., muitas informações foram levantadas sobre a área, mas nem todas elas foram utilizadas no processo de modelagem. Grande parte dos dados citados foram utilizados no processo de caracterização da área de estudo, caracterização esta, apresentada no início deste capítulo.

Inicialmente os dados que se apresentavam em diferentes tipos de mídia (papel, meio digital, etc.) foram compatibilizados e reunidos em uma unidade digital de armazenamento de forma a centralizar as informações e, principalmente, facilitar o gerenciamento dos dados no SIG. Além disso, foram identificadas divergências nos dados quanto ao sistema de georeferência utilizado. A malha gerada para a área de estudo no ModFlow, por exemplo, encontrava-se em um sistema de referência que não correspondia a nenhuma projeção cartográfica usual.

Os dados obtidos junto a SEPLAN/PMJP (Secretaria de Planejamento da Prefeitura de João Pessoa) apresentam-se com a Projeção Cartográfica UTM (Universal Transverse Mercator) e unidades de mapa em metros. Por ser este um formato bastante usual em planejamento urbano, todas as demais informações foram convertidas para esta projeção cartográfica e para este sistema de unidades. A malha de células gerada no ModFlow, além de georeferenciada, foi redimensionada para que as simulações desta pesquisa fossem possíveis. O tamanho da célula adotado pelos estudos da ATECEL/UFPB (1999) era de 100x100 (metros). A malha inteira foi redimensionada para células de 5x5 (metros), mesma resolução espacial que foi adotada para todos os dados em formato raster utilizados no SIG. O redimensionamento da malha implicou em uma nova calibração do modelo hidrológico para a área de estudo. Além disso, foi verificada a compatibilidade dos formatos de entrada e/ou saída de dados entre o ArcView (SIG) e o ModFlow para evitar problemas na implementação.

³ Processo de ajuste de alguns parâmetros e relações para que o modelo se comporte em diferentes situações de forma análoga ao sistema real por ele representado.

4.4.4.2. Desenvolvimento do Modelo

A estruturação do problema no modelo conceitual é representada na modelagem espacial através do uso de fluxogramas ou diagramas esquemáticos. Além disso, a conversão de todas as informações em “planos” é realizada, teoricamente, nesta fase da implementação. Para uma leitura mais clara dos fluxogramas gerados na modelagem, faz-se necessária uma compreensão da notação gráfica (convenção) utilizada, a qual, é apresentada através da Figura 26.



Figura 26 – Convenções utilizadas nos fluxogramas.

ALTERNATIVA A - Diagnóstico Inicial: Identificar “melhores” áreas para ocupação e “avaliar” as áreas já ocupadas do ponto vista da susceptibilidade a alagamentos.

A.1. Dentre os lotes já ocupados, identificar as áreas mais susceptíveis a alagamentos, considerando as seguintes hipóteses (Figura 27 e 28):

- Lotes ocupados em ruas pavimentadas possuem pouco ou nenhum risco de alagamento
- Lotes em áreas muito rasas, com baixos valores de declividade e muito próximos a corpos hídricos existentes possuem maior risco de alagamento.

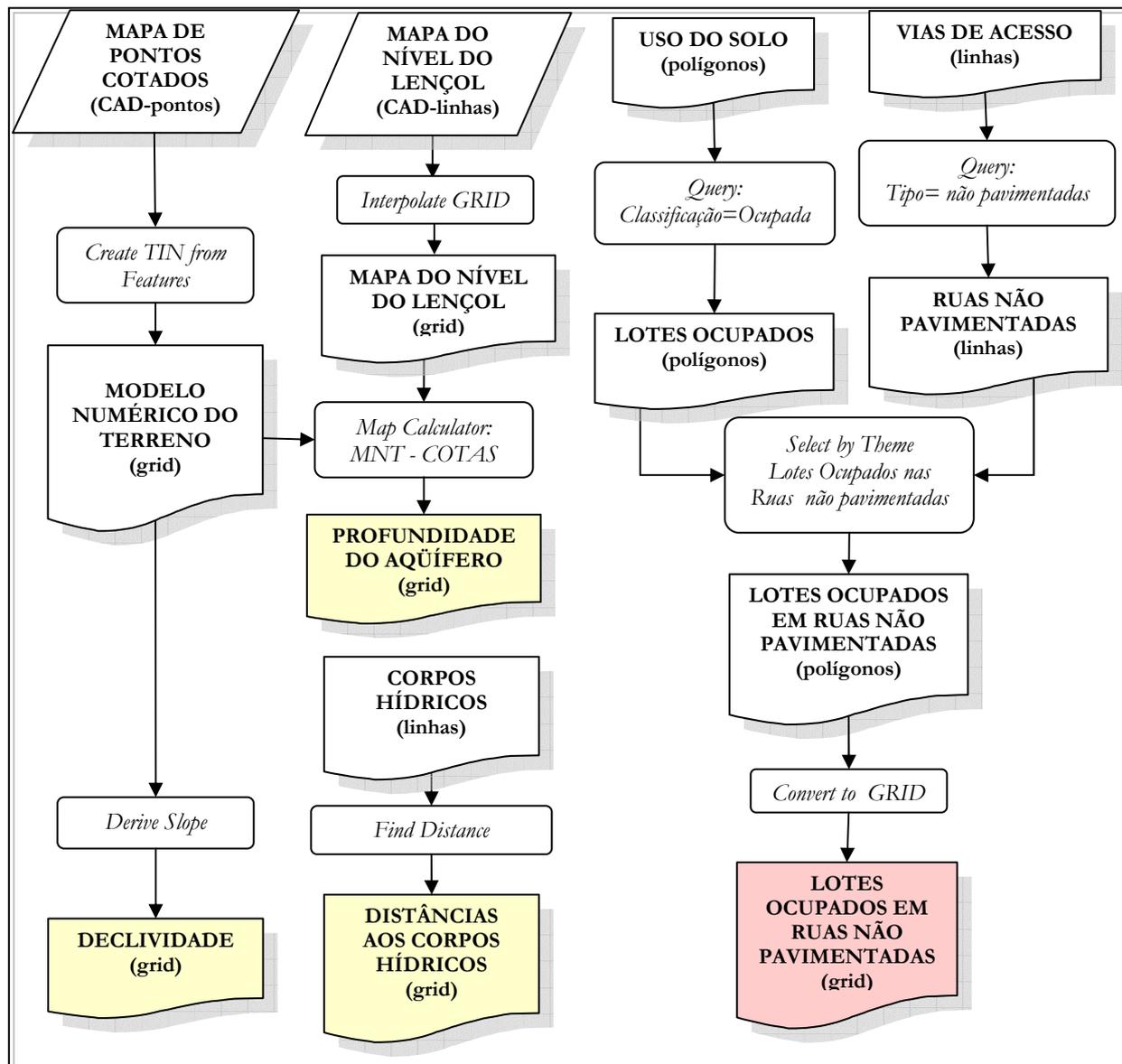


Figura 27 – Alternativa A: modelagem espacial do item A.1.

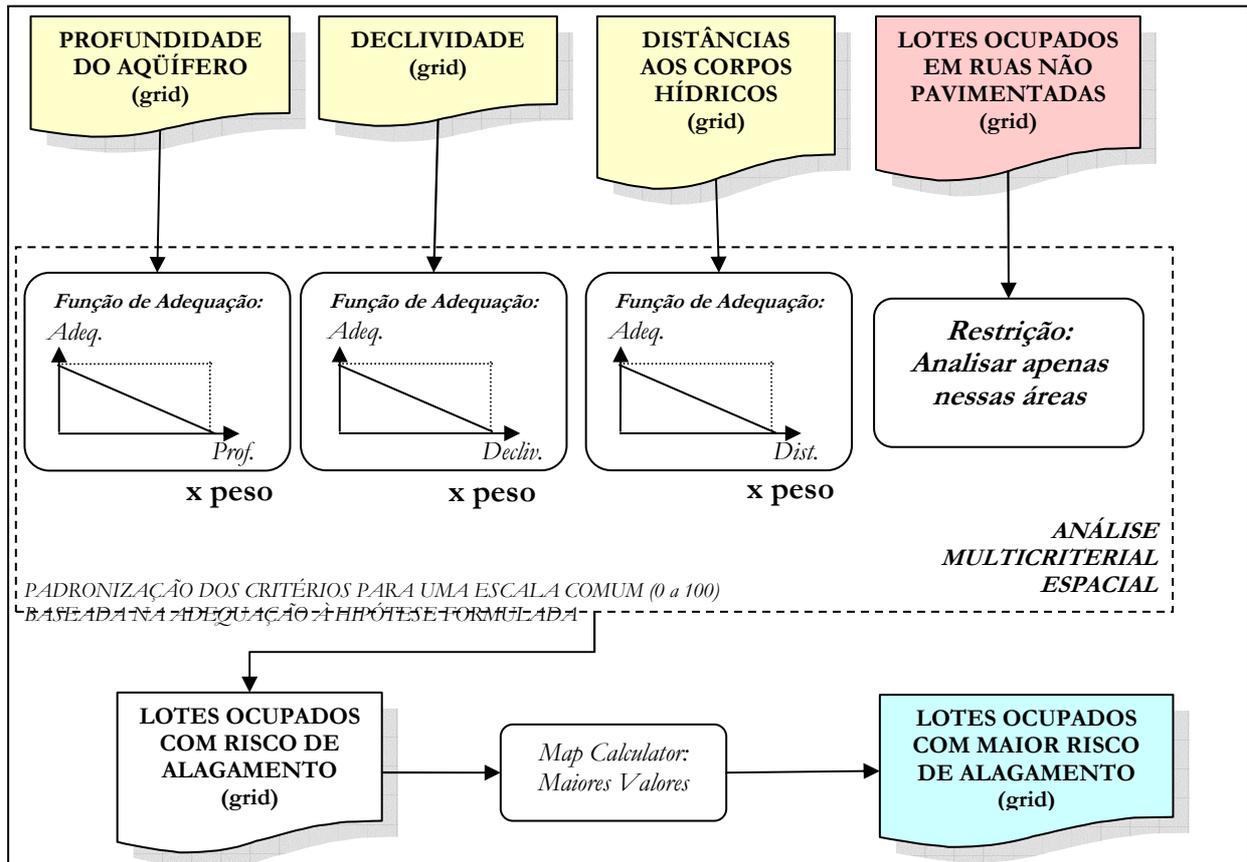


Figura 28 – Alternativa A: modelagem espacial do item A.1. (cont.)

A.2. Avaliar o risco de “ilhas”: lotes, ocupados ou não, cercados por áreas muito “rasas” (Figura 29);

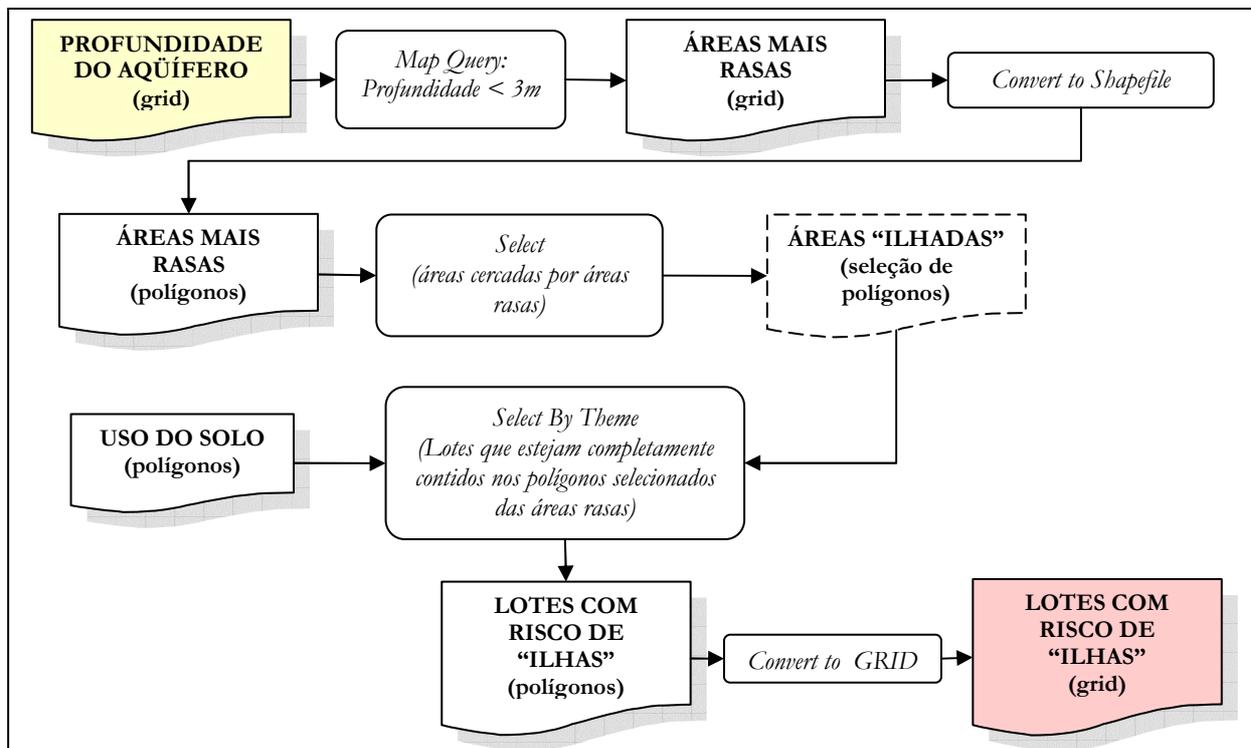


Figura 29 – Alternativa A: modelagem espacial do item A.2.

A.3. Estabelecer restrições de ocupação baseadas na legislação vigente: distâncias mínimas previstas e áreas de preservação permanente, considerando as seguintes hipóteses (Figura 30):

- O rio Jaguaribe (mesmo a parte canalizada) e as lagoas sazonais serão considerados corpos hídricos com mais de 10 metros e menos de 50 metros de largura, portanto, a legislação vigente estabelece como de preservação permanente uma faixa marginal de 50 m.

- Os demais drenos serão considerados corpos hídricos com menos de 10 metros de largura, portanto, a legislação vigente estabelece como de preservação permanente uma faixa marginal de 30 m.

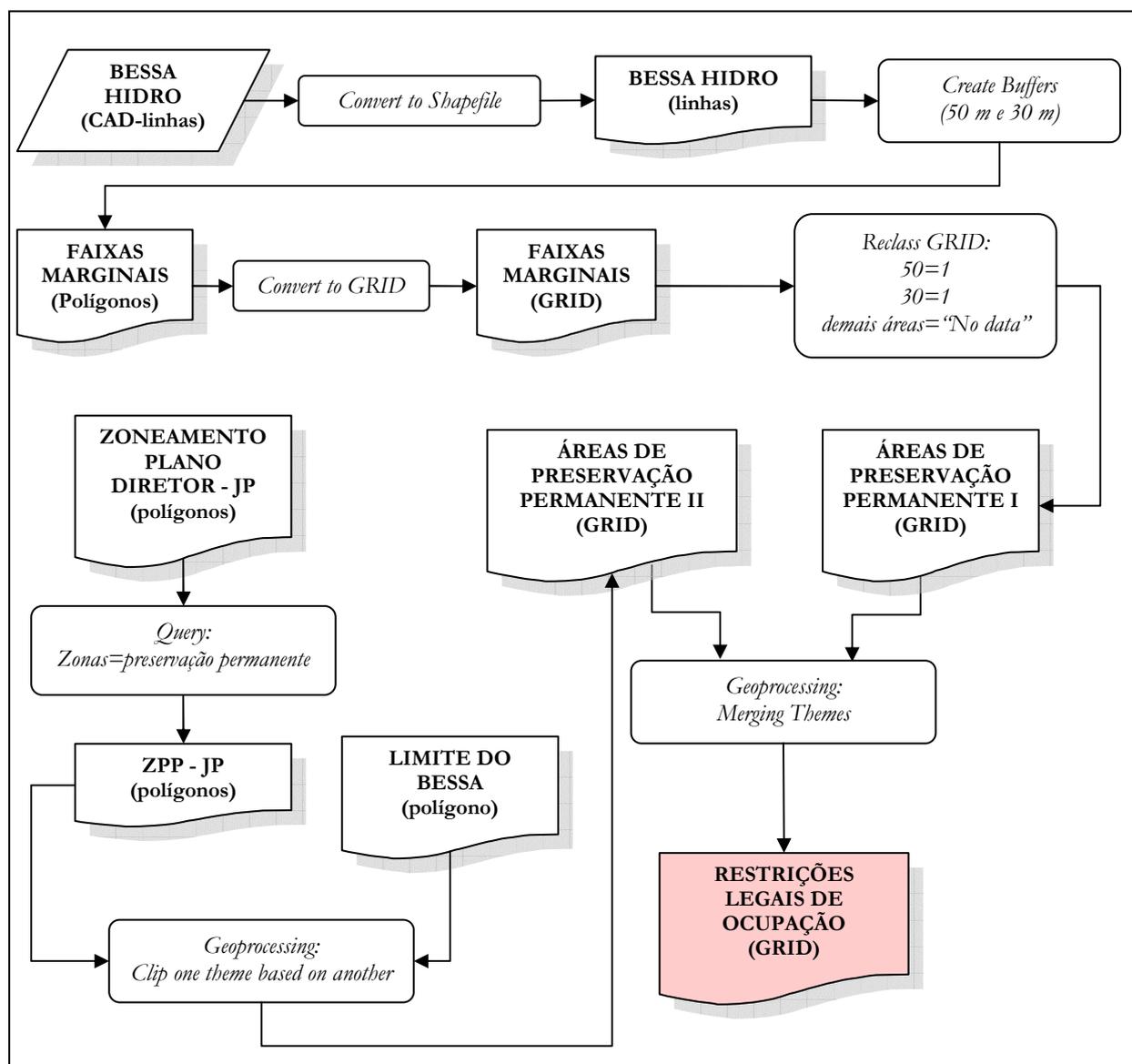


Figura 30 - Alternativa A: modelagem espacial do item A.3.

A.4. Dentre os lotes não ocupados, identificar as melhores áreas considerando (Figura 31):

- As áreas de preservação permanente não devem ser ocupadas sob hipótese alguma
- Áreas mais distantes de corpos hídricos ou drenos existentes, com cotas de profundidade do aquífero maiores, com declividades que não sejam muito baixas, distantes dos lotes ocupados com maior risco de alagamento e próximos a uma via de acesso pavimentada serão os melhores lotes para ocupação (devem ter maior valor econômico).

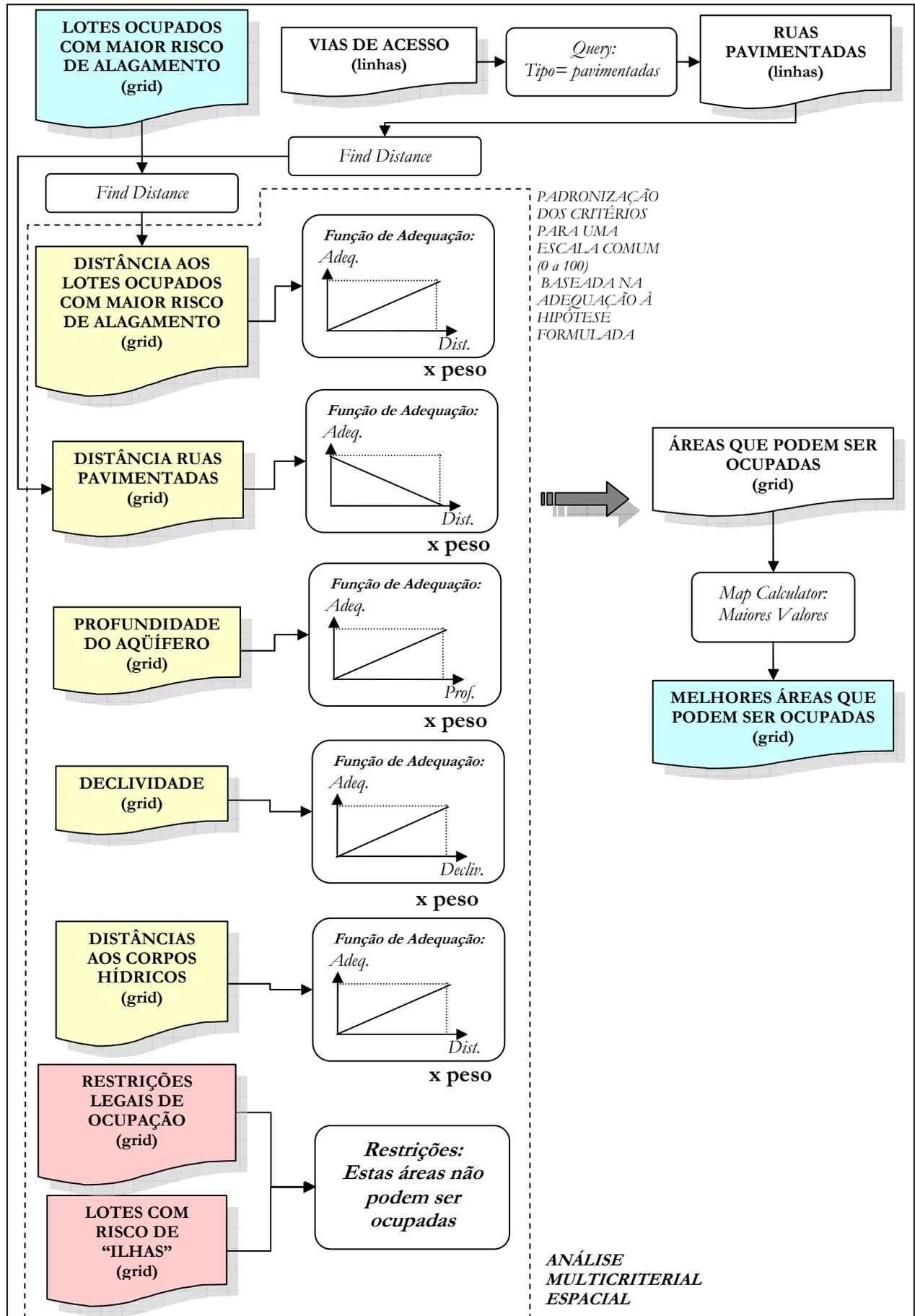


Figura 31 - Alternativa A: modelagem espacial do item A.4 (conclusão da alternativa).

ALTERNATIVA B - Rebaixamento do Lençol para evitar o extravasamento

B.1. Simular a existência de poços em algumas localizações, considerando as seguintes hipóteses (Figuras 32 e 33):

- Edifícios com mais de 20 unidades habitacionais poderiam utilizar água do freático para usos como: lavagem de carros e calçadas, limpeza de fachadas, irrigação de jardins, etc. Além disso, os especialistas consultados afirmam que alguns destes edifícios já possuem poços em funcionamento (dado ausente nos cadastros oficiais);
- Algumas Igrejas no bairro já possuem poços (dado ausente nos cadastros oficiais);
- As praças poderiam ser locais de abastecimento dos carros-pipa que normalmente regam os canteiros das vias principais do bairro (atualmente estes carros trazem água de outros locais para esse fim);
- Os postos de lavagem poderiam economizar água encanada e bombear água do freático;
- Muitas das “mini-granjas” e residências de alto padrão do bairro possuem enormes áreas verdes que poderiam ser irrigadas com água do freático. Além disso os especialistas consultados afirmam que algumas destas edificações já possuem poços (dado ausente nos cadastros oficiais);
- Alguns dos lotes maiores desocupados podem vir a ser praças, e, portanto, podem abrigar poços para os usos citados anteriormente;
- As áreas mais rasas são as mesmas já calculadas na alternativa anterior;

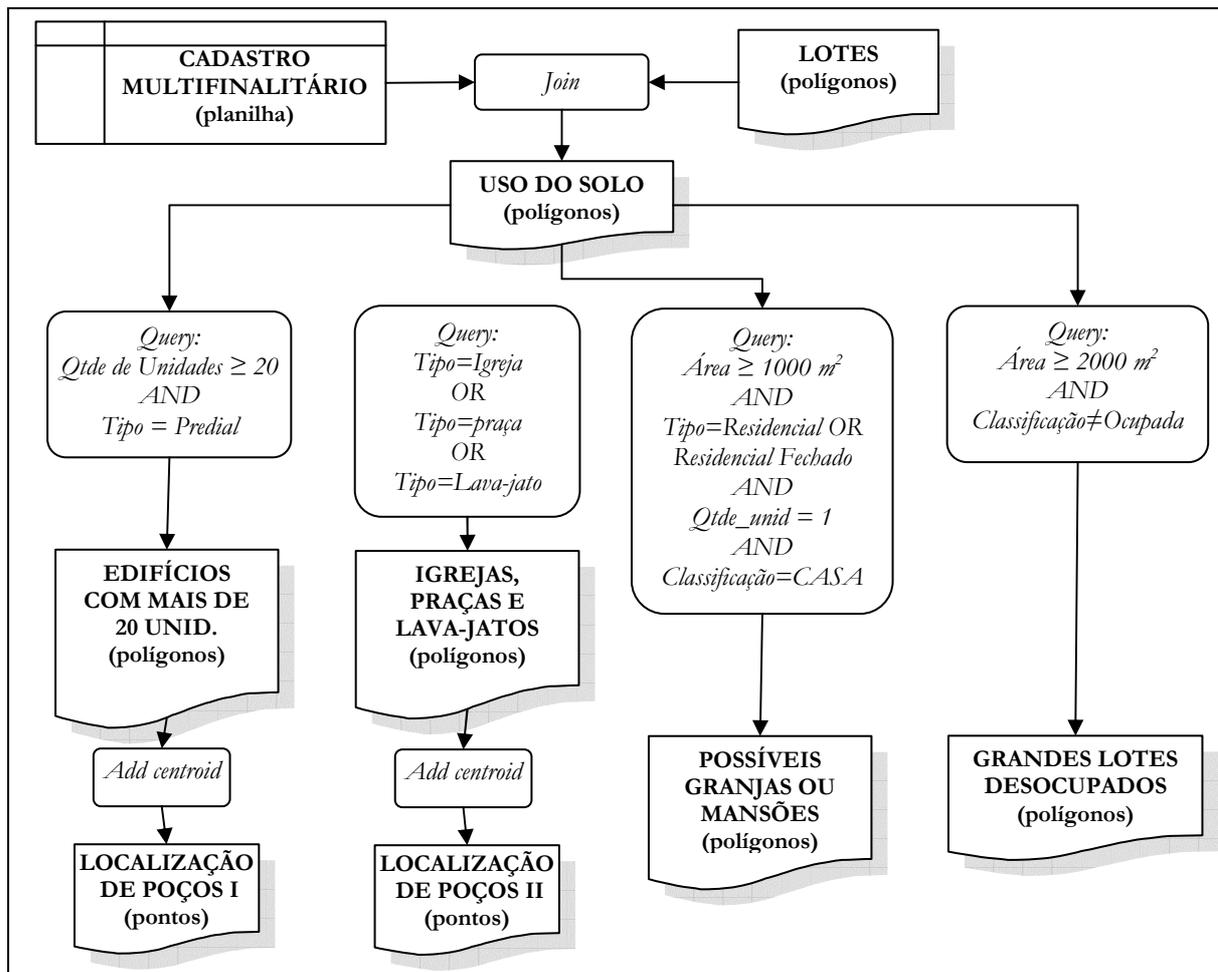


Figura 32 - Alternativa B: modelagem espacial do item B.1.

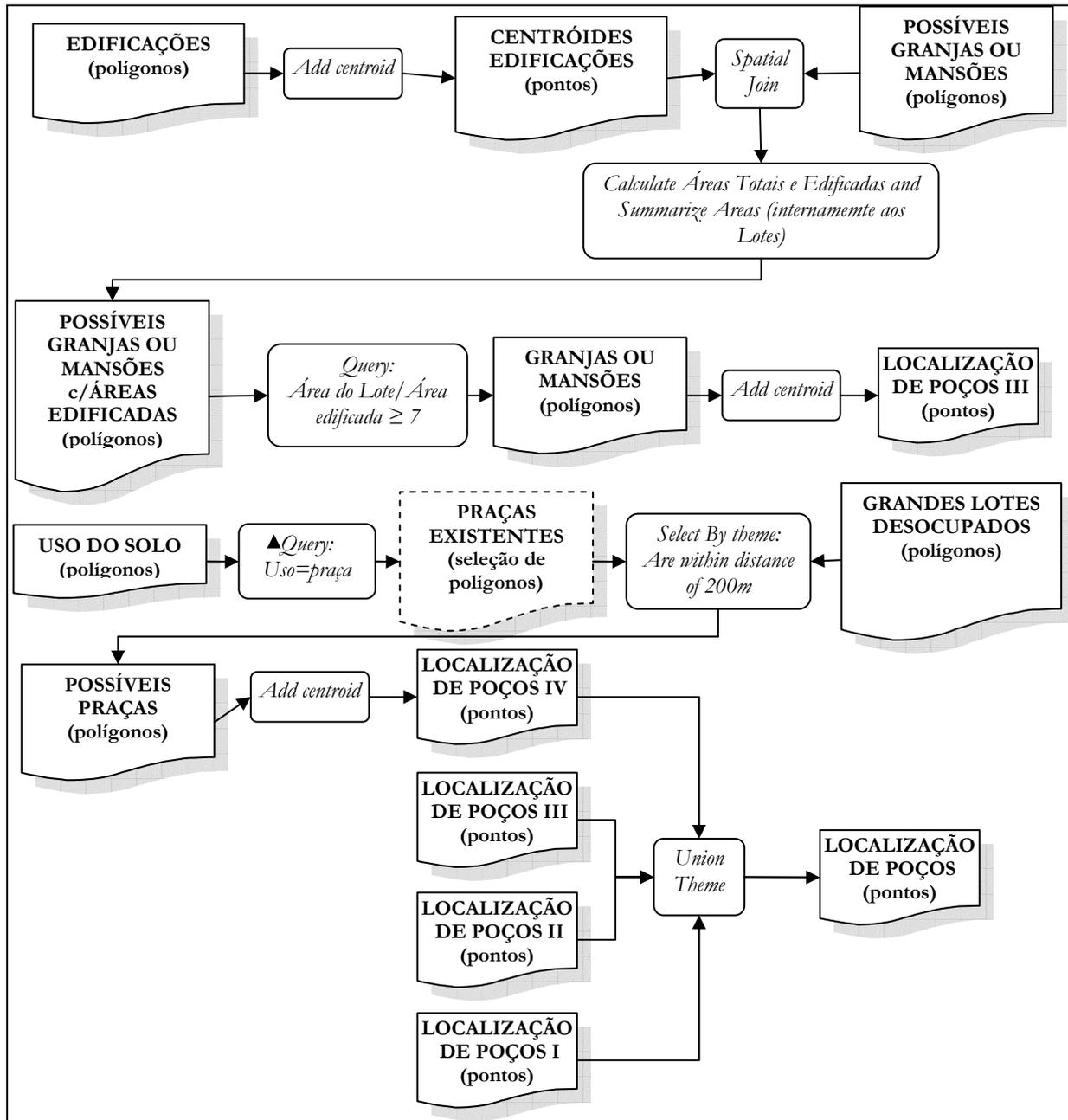


Figura 33 - Alternativa B: modelagem espacial do item B.1. (cont.).

B.2. Escolher “preferencialmente” o bombeamento de poços nas áreas onde o nível do aquífero é mais raso no período mais seco (profundidades ≤ 3 m): Considerar que o plano de informação referente às áreas onde o aquífero é mais raso já foi gerado para a alternativa “A” (Figura 34).

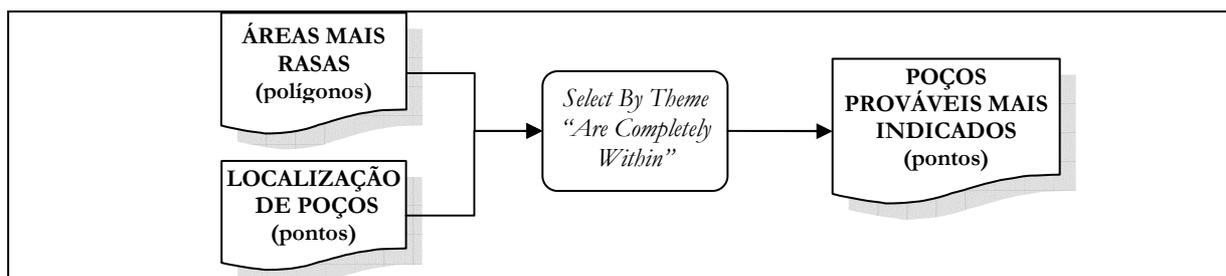


Figura 34 - Alternativa B: modelagem espacial do item B.2.

B.3. Simular a existência de poço nos locais de afloramento mais frequentes e identificar estes locais (Figura 35):

- Adicionar a recarga uniforme ao nível do aquífero no período seco observado (Maio 99 – GRID que já foi gerado na alternativa “A”), considerando que se os afloramentos acontecem nestas condições, acontecerá mais provavelmente em períodos chuvosos.

- Repetir o procedimento abaixo para diferentes valores de recarga (100 a 400 mm) e verificar se surgem novos pontos de afloramento ou se apenas aumenta a área aflorante já identificada.

B.4. Nas proximidades dos pontos de afloramento identificados localizar possíveis poços.

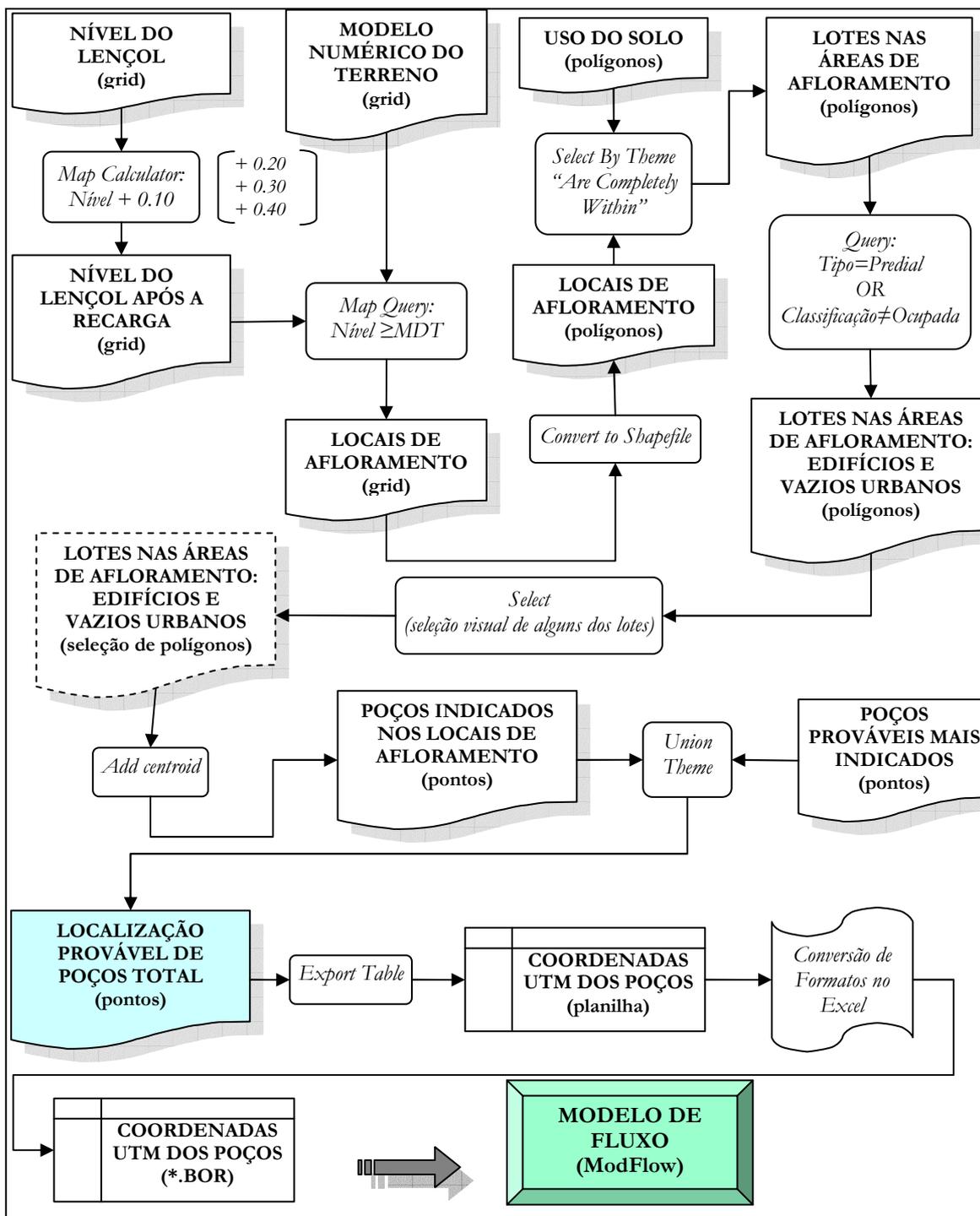


Figura 35 - Alternativa B: modelagem espacial dos itens B.3. e B.4.

B.5. Rebaixar suficientemente no período seco para não ser necessário aumentar o bombeamento no período chuvoso. Para tanto faz-se necessário estabelecer uma vazão de bombeamento destes poços (valor apoiado no conhecimento dos especialistas):

- Vazão Utilizada nas Simulações:

$Q=150$ litros por habitante/dia = $0,15 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{dia}$

01 unidade habitacional= 4 habitantes = $0,6 \text{ m}^3/\text{dia}$

01 edifício com 20 unidades habitacionais = $12 \text{ m}^3/\text{dia}$

O valor médio adotado foi $10 \text{ m}^3/\text{dia}$, considerando que essa água será destinada a alguns usos mais específicos (lavagem de carros, calçadas, irrigação de jardins, etc.), mas que em alguns casos grandes áreas poderão ser irrigadas (abastecimento de carros-pipa, áreas verdes de granjas, etc.).

B.6. Simular o bombeamento dos poços (Figura 36):

- Com a mesma vazão: $10 \text{ m}^3/\text{dia}$ para todos os poços simulados;
- Com vazões diferenciadas pelo uso ou localização: $20 \text{ m}^3/\text{dia}$ para poços localizados nas praças (existentes e simuladas), $20 \text{ m}^3/\text{dia}$ nos locais de afloramento e $10 \text{ m}^3/\text{dia}$ nos demais poços simulados;

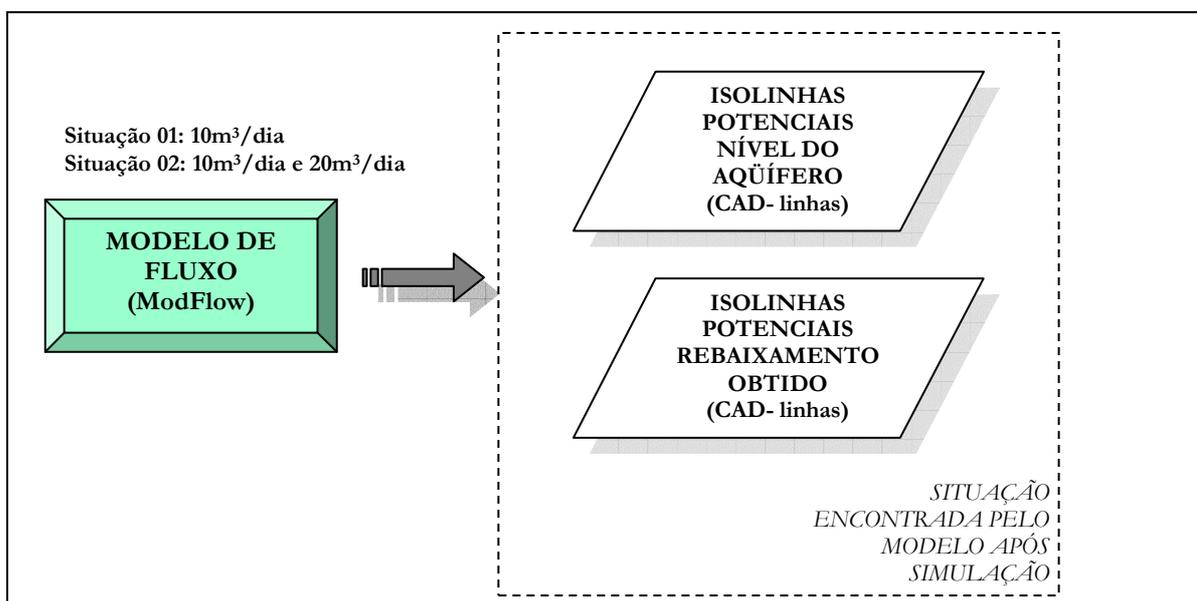


Figura 36 - Alternativa B: resultados esperados após simulação no modelo de fluxo subterrâneo.

B.7. Limitar a simulação baseada na intrusão salina (Figura 37):

- Nas simulações observar quando o nível do aquífero se apresentar muito baixo próximo da linha de costa;
- Analisar através da geração de linhas de direção de fluxo (ModFlow);
- Se necessário for, retirar alguns dos poços para não haver intrusão salina;

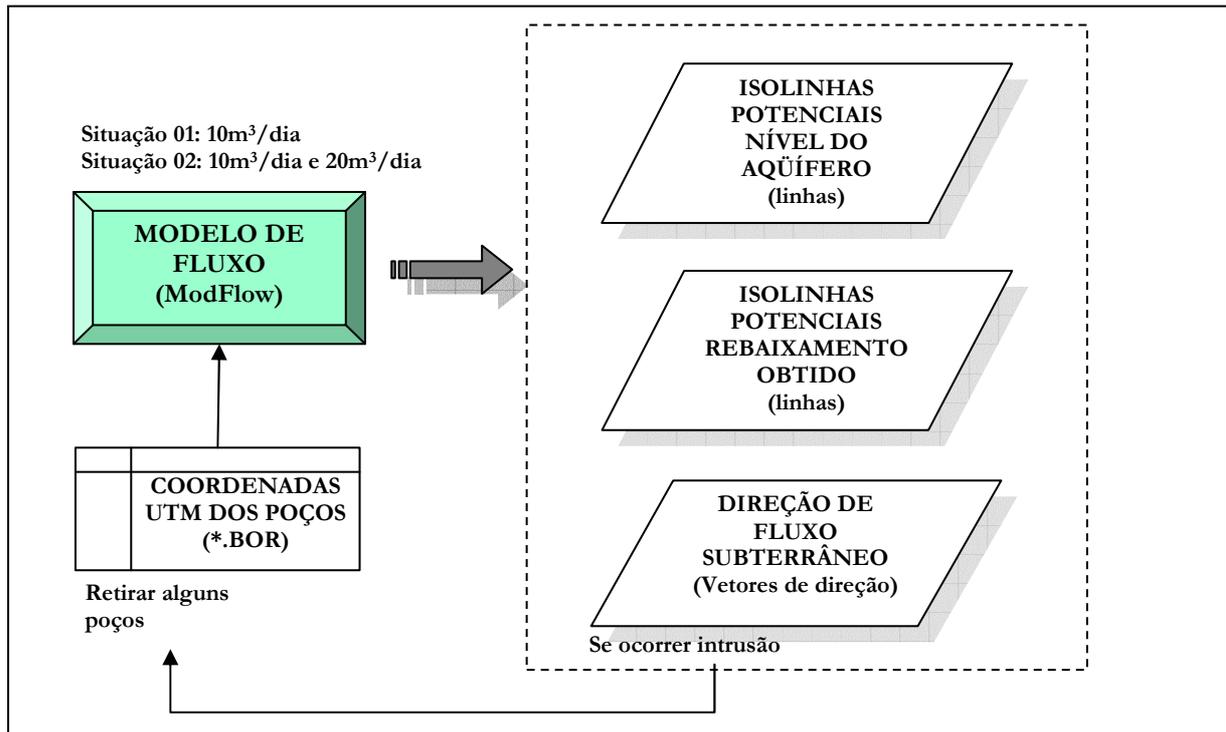


Figura 37 - Alternativa B: simulação de vazões diferenciadas e verificação de intrusão salina.

ALTERNATIVA C - Promover um bom funcionamento dos canais para permitir uma drenagem eficiente

C.1. Simular a existência de poços nas localizações apontadas pela alternativa A considerando a proximidade dos canais (200 m) (Figura 38):

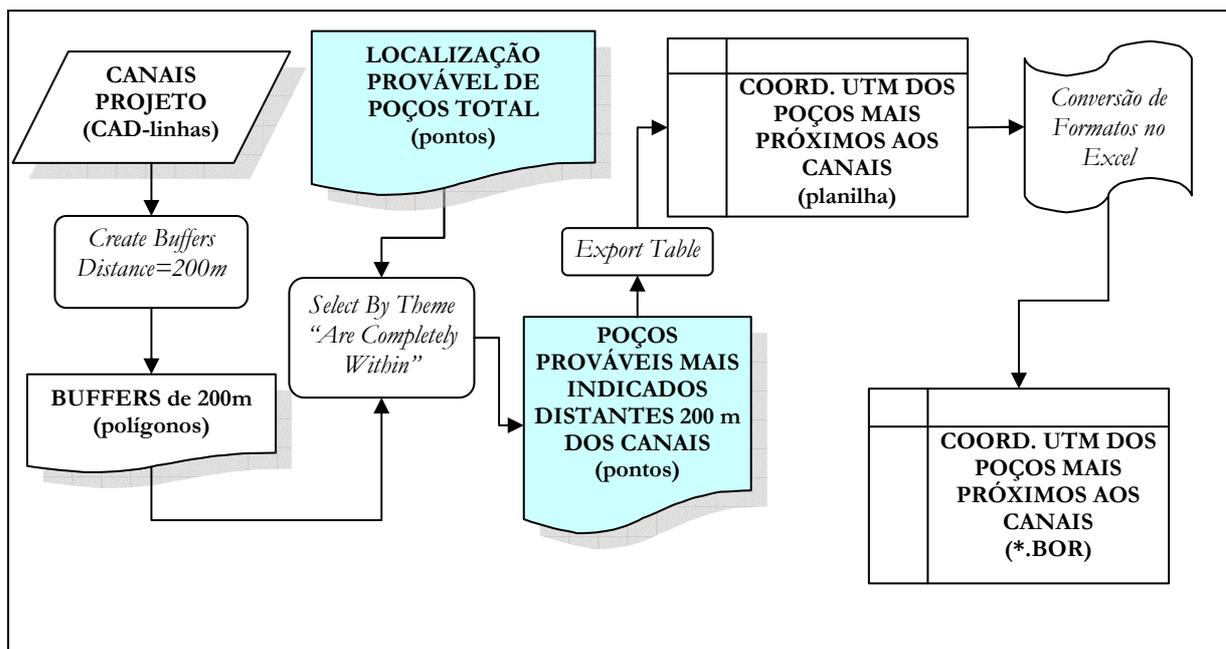


Figura 38 - Alternativa C: modelagem espacial do item C.1.

C.2. Simular o funcionamento dos canais como drenos subterrâneos considerando um funcionamento ótimo, ou seja, sem problemas de limpeza/obstrução (Figura 39);

- Simular o funcionamento dos canais enquanto drenos subterrâneos (função que desempenha através das juntas de dilatação), na situação de bombeamento de poços em um raio de 200 metros dos quatro canais de drenagem;

C.3. Limitar a análise baseada na intrusão salina, observando nas simulações quando o nível do aquífero se apresentar muito baixo próximo da linha de costa (Figura 39).

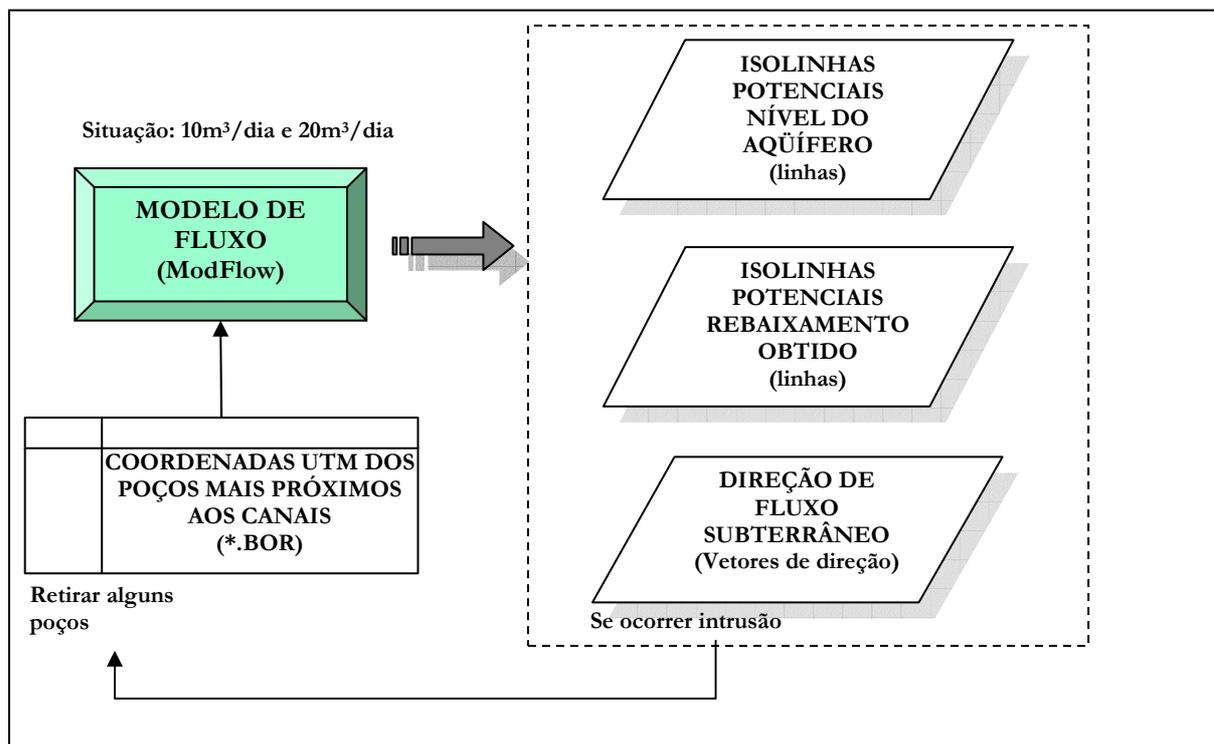


Figura 39 - Alternativa C: modelagem espacial dos itens C.2. e C.3.

ALTERNATIVA D - Garantir uma quantidade mínima de áreas de recarga para o equilíbrio do aquífero

D.1. Identificar as áreas de recarga apontadas pela modelagem (Figura 40);

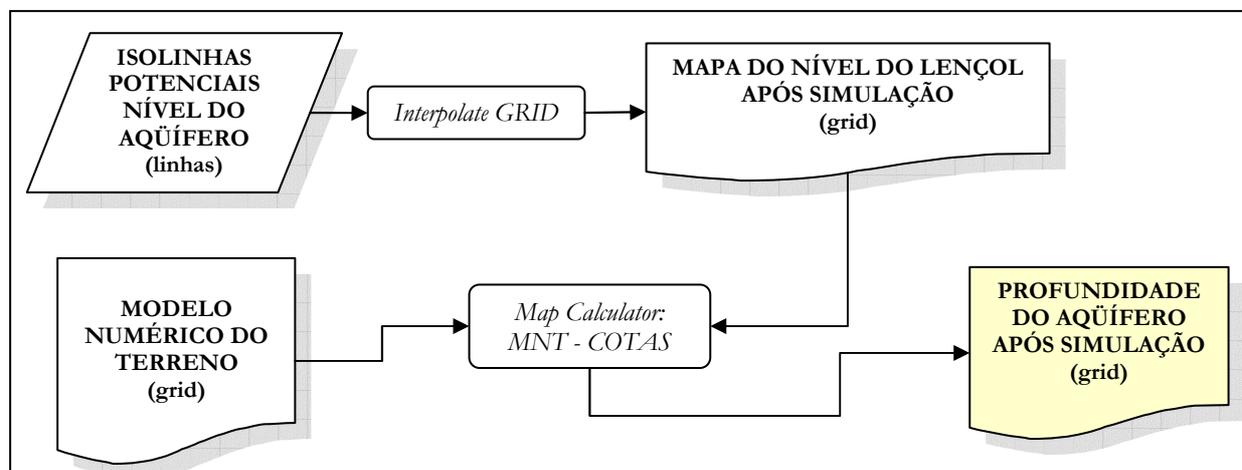


Figura 40 - Alternativa D: modelagem espacial do item D.1.

D.2. Determinar através de características como permeabilidade do solo, declividade e precipitação as áreas mais indicadas para recarga do aquífero (Figura 41):

- Considerar uma precipitação média de 200 mm em todo o bairro.
- Recarga = declividade + precipitação + permeabilidade + profundidade do aquífero.
(Considerar as funções de adequação citadas na modelagem conceitual).

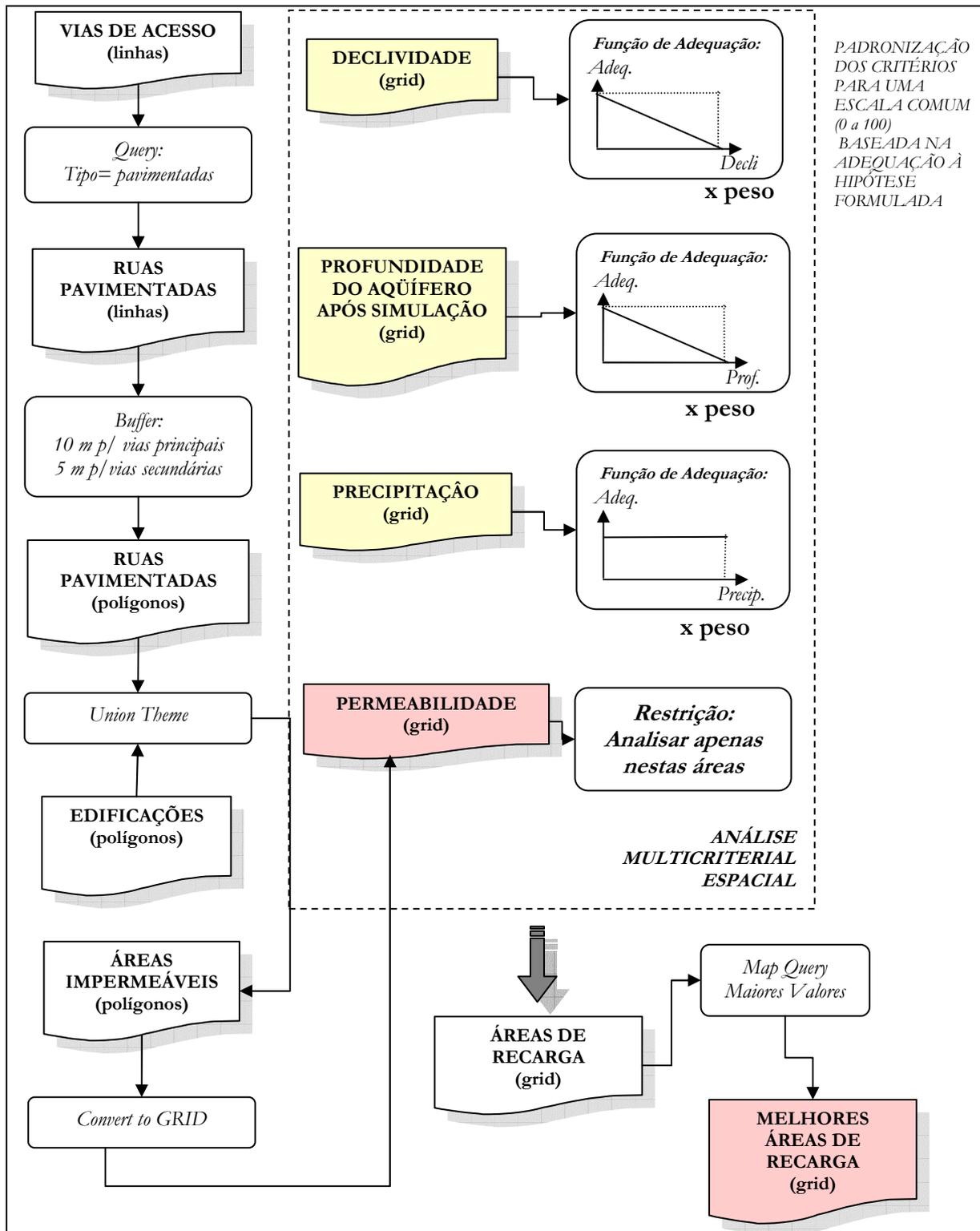


Figura 41 – Alternativa D: modelagem espacial do item D.2.

D.3. Apontar possibilidade e/ou viabilidade de áreas verdes para servirem de áreas de recarga: através de funções de adequação às hipóteses formuladas na modelagem conceitual (Figura 42).

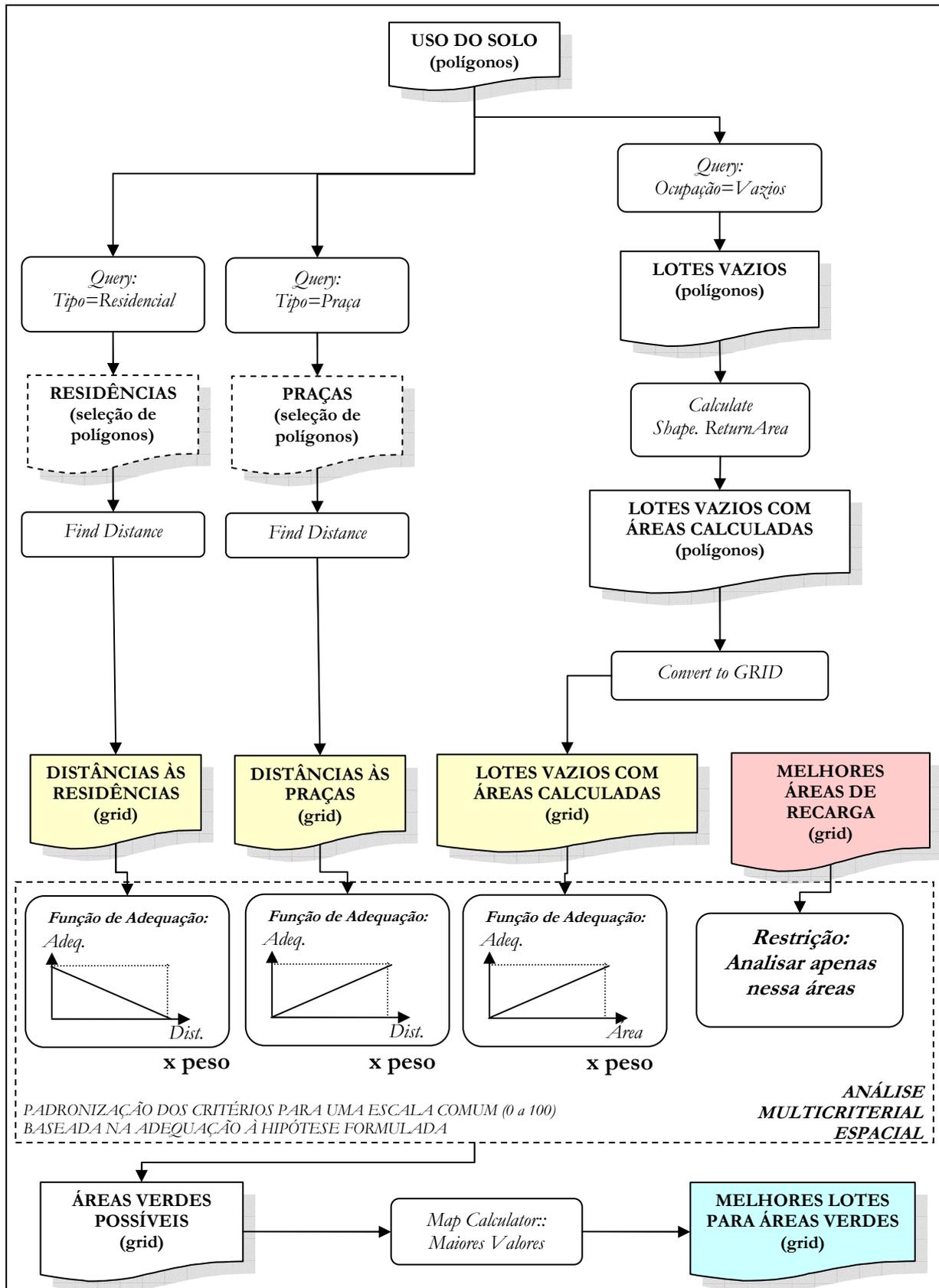


Figura 42 – Alternativa D: modelagem espacial do item D.3.

ESCOLHA ENTRE ALTERNATIVAS

A modelagem das alternativas segue a seqüência proposta no item 4.4.2. pela equipe de gestão. Esta seqüência obedece a uma certa prioridade de intervenção na área do Bessa, assumindo que as alternativas de gestão sugeridas, devam ser implementadas nesta ordem: A, B, C e D. Contudo, como o modelo prevê uma escolha entre alternativas? Como apoiar uma decisão se, por escassez de recursos financeiros, ou mesmo por questões políticas, nem *todas* as sugestões possam ser implementadas pelos órgãos gestores? O modelo cartográfico desenvolvido deve possibilitar esta escolha, inclusive permitindo a inserção de preferências de acordo com as prioridades estabelecidas na gestão (Figura 43).

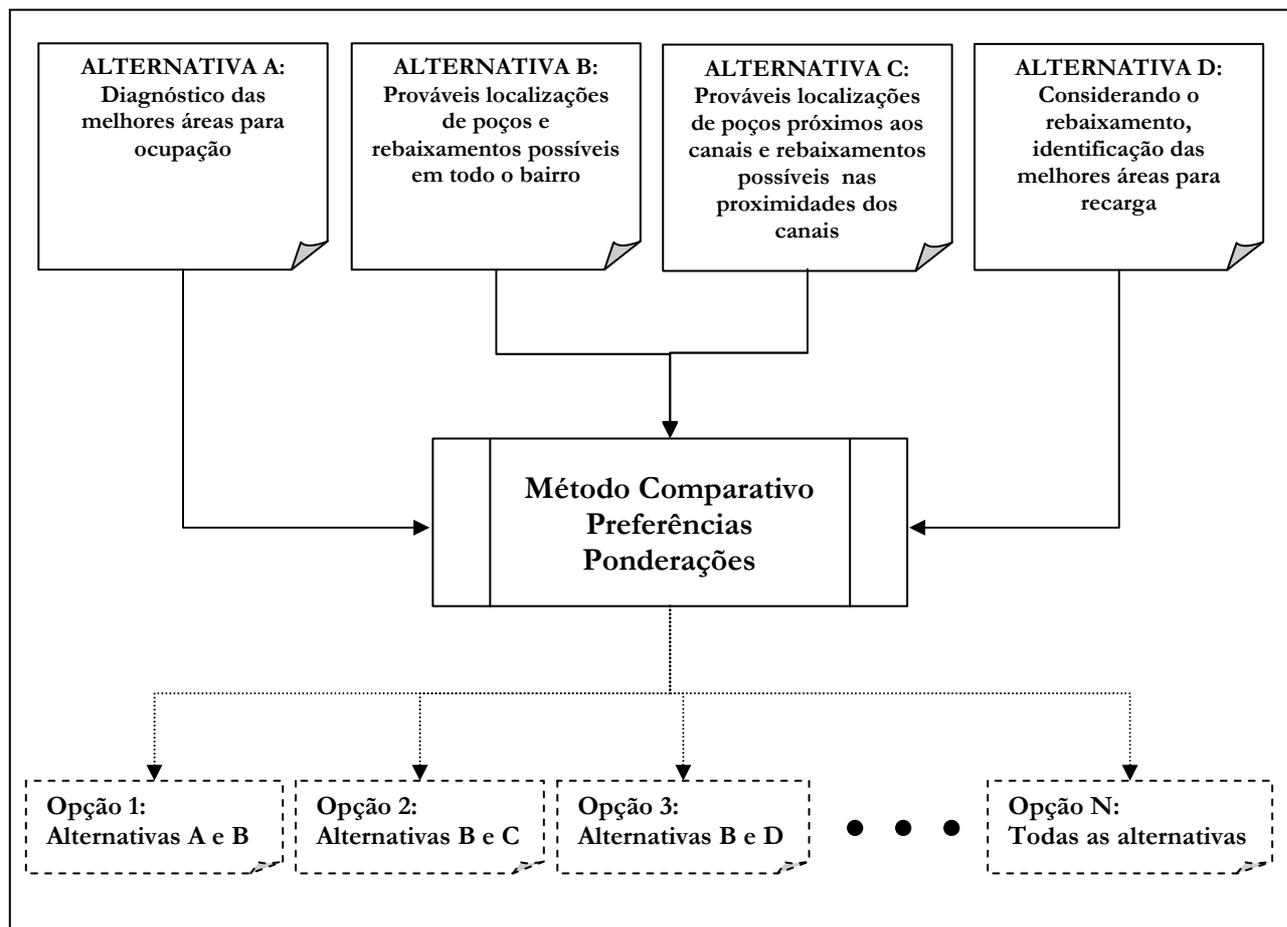


Figura 43 – Escolha entre alternativas.

Vários fatores podem determinar a escolha entre as alternativas, a saber: recursos financeiros, interesses políticos, prioridades de intervenção, etc. Por este motivo, podem ser utilizados métodos de comparação diversos nesta escolha. Um método comparativo muito utilizado em SIGs é o método da matriz de comparação pareada, uma incorporação da técnica AHP (Saaty, 1980) no ambiente SIG, cuja descrição detalhada pode ser verificada no item 2.3.4.3 do Capítulo 2 deste documento.

4.4.4.3. Implementação

Uma vez concluída a modelagem espacial, a fase de implementação resume-se à execução de todos os comandos e etapas representadas no modelo de forma a obter os resultados esperados. Entretanto, muitas vezes, no decorrer da implementação, algumas falhas na modelagem podem ser identificadas, o que implica em um retorno ao modelo para alguma correção. Os problemas identificados na implementação serão discutidos no capítulo seguinte, bem como os resultados finais de cada uma das alternativas modeladas.

Nesta fase, também pode-se visualizar pela primeira vez o conhecimento envolvido no problema abordado de forma espacializada. Alguns dos planos de informação gerados representam o conhecimento modelado dos especialistas, outros representam conhecimentos advindos de informações coletadas junto aos órgãos de gestão consultados e outros, ainda, representam uma “composição” de conhecimentos dos especialistas, dos dados levantados, do pesquisador implementador, da bibliografia consultada, etc.

Nesse sentido, são apresentados a seguir alguns dos muitos planos de informação que foram gerados de forma intermediária entre o modelo espacial e os resultados finais de cada alternativa sugerida.

✱ Profundidade do Aquífero

O mapa de profundidade do aquífero utilizado na maioria das alternativas (exceto na alternativa D) foi obtido a partir das isolinhas potenciais geradas pelo ModFlow, que correspondem ao nível freático observado no período de maio de 1999. As medições do nível do aquífero foram feitas mediante a perfuração de aproximadamente 107 poços de sondagens, transformados em piezômetros, onde mensalmente foram colhidos valores do nível d'água. As sondagens atingiram níveis que variaram entre 2,00 a 6,00 metros de profundidade, todos atingindo um mínimo de 1,50 metros abaixo do nível do freático, não havendo necessidade de sondagens mais profundas, já que a litologia da região apresenta características aproximadamente uniformes, com material arenoso fino a médio. Os estudos realizados pela ATECEL/UFPA contemplaram duas campanhas de medições, sendo a primeira compreendida no período de novembro de 1998 a julho de 1999 e a segunda de novembro de 2001 a dezembro de 2002, mostrados respectivamente na Tabela 5 e na Tabela 6. Para a calibração do modelo apenas os dados da primeira campanha de medições (Tabela 5) foram utilizados.

Tabela 5:

Cotas da superfície piezométrica do aquífero obtidas pela ATECEL/UFPB (1999) durante a primeira campanha de medição (Marques, 2004)

Nº PIEZ.	NÍVEL NOV/98	NÍVEL FEV/99	NÍVEL MAR/99	NÍVEL MAI/99	NÍVEL JUN/99	NÍVEL JUL/99
1	--	1,630	1,740	1,890	--	--
2	--	1,890	2,070	2,210	--	--
3	--	1,544	1,774	2,034	2,194	1,994
4	2,841	2,236	2,196	3,126	2,736	2,506
6	2,481	1,925	1,895	2,265	2,395	2,195
7	2,891	2,245	--	2,945	--	--
8	2,220	2,100	2,000	2,300	--	--
9	3,220	2,523	2,533	2,873	--	--
11	2,277	2,188	2,208	2,508	2,628	2,138
12	2,139	--	--	2,509	--	--
13	1,722	1,532	2,062	2,032	--	--
15	2,299	1,954	2,324	2,624	2,694	1,954
16	2,586	2,184	2,204	2,504	2,574	2,184
17	2,285	--	--	1,595	--	--
18	2,364	1,884	1,814	2,044	--	3,024
19	--	1,385	1,295	1,395	--	2,585
20	--	1,348	1,268	1,308	--	--
21	2,824	2,397	2,387	2,757	2,877	2,597
22	2,849	--	--	2,759	--	--
24	3,255	2,655	2,605	2,815	--	--
25	3,263	2,524	2,504	2,864	3,084	2,914
27	2,852	2,218	2,138	2,508	--	--
28	--	2,265	2,185	2,495	--	--
29	2,833	2,120	2,020	2,740	--	--
30	2,719	2,138	1,058	2,418	2,608	2,478
31	2,845	2,208	2,388	2,738	2,778	2,538
32	2,801	2,453	2,453	2,773	2,813	2,553
33	2,663	2,106	2,386	2,736	2,776	2,516
35	3,452	2,849	2,689	2,959	3,199	3,079
36	3,545	2,832	2,752	3,062	3,322	3,022
37	3,768	2,895	2,845	3,115	3,355	3,245
38	3,504	2,742	2,632	2,902	3,172	3,082
39	3,069	2,347	2,247	2,647	2,857	2,747
40	2,711	2,173	2,173	2,333	2,543	2,423
41	3,243	2,523	2,403	2,623	3,153	3,083
42	3,648	2,910	2,800	3,020	3,280	3,230
43	--	2,357	2,267	2,477	--	2,877
44	3,323	2,654	2,544	2,734	2,944	2,914
45	--	2,364	2,274	2,454	2,714	2,704
46	--	2,231	2,931	3,161	--	3,101
47	3,542	2,844	2,754	2,904	3,164	3,154
48	3,301	2,674	2,644	2,934	3,114	2,934
49	2,987	2,267	2,197	2,547	--	--
50	2,735	2,106	2,036	1,766	2,346	2,366
51	3,083	2,373	2,293	2,423	--	--
52	3,364	2,665	2,595	2,695	2,935	2,955
53	2,847	2,138	2,148	2,238	--	--
54	2,301	1,718	1,658	1,768	2,018	1,988
55	2,377	1,744	1,724	1,874	--	--
56	1,958	1,383	1,393	1,523	1,803	1,803
57	2,134	1,511	1,511	1,681	2,081	1,931
58	2,688	2,368	2,288	2,418	2,668	2,638
59	2,922	2,381	2,311	2,471	2,791	2,591
60	3,642	3,017	2,937	3,107	--	--
61	3,433	2,833	2,813	3,033	3,473	3,233
62	3,456	2,885	2,845	3,085	3,495	3,265
63	3,673	--	--	3,955	--	3,795
64	2,766	2,468	2,448	2,658	--	3,148
45	--	2,364	2,274	2,454	2,714	2,704
46	--	2,231	2,931	3,161	--	3,101
47	3,542	2,844	2,754	2,904	3,164	3,154
48	3,301	2,674	2,644	2,934	3,114	2,934
49	2,987	2,267	2,197	2,547	--	--
50	2,735	2,106	2,036	1,766	2,346	2,366
51	3,083	2,373	2,293	2,423	--	--
52	3,364	2,665	2,595	2,695	2,935	2,955
53	2,847	2,138	2,148	2,238	--	--
54	2,301	1,718	1,658	1,768	2,018	1,988
65	1,576	1,065	1,035	1,205	1,325	1,255
66	--	3,560	3,470	3,690	--	--
67	--	2,926	2,846	3,126	--	--
68	--	2,601	2,571	2,881	3,181	3,001
69	--	2,850	2,790	3,070	--	--
70	--	2,088	2,078	2,388	--	--
72	--	1,356	2,926	3,131	--	--
73	--	2,576	2,496	2,676	--	--
74	--	2,734	2,704	3,054	3,224	3,064
75	--	2,781	2,771	3,541	--	--
76	--	2,149	2,129	2,429	2,629	2,469
77	--	1,874	1,774	1,984	--	2,644
78	--	2,289	2,279	2,619	--	2,649
79	--	1,978	1,898	2,148	--	2,578
80	--	2,502	2,422	2,682	--	--

Tabela 6:

Cotas da superfície piezométrica do aquífero, obtidas pela ATECEL/UFPA (1999) na segunda campanha de medição (Marques, 2004).

Nº PIEZ	Nível Nov/01	Nível Dez/01	Nível Jan/02	Nível Fev/02	Nível Mar/02	Nível Abr/02	Nível Jun/02	Nível Jul/02	Nível Ago/02	Nível Out/02	Nível Nov/02	Nível Dez/02
10	1,173	1,143	1,293	1,363	1,423	1,263	1,500	1,753	1,643	1,473	1,393	
11	1,487	1,457	1,627	1,667	1,787	1,607	2,037	2,217	2,067	1,657	1,537	
13	1,482	1,472	1,652	1,802	2,082	1,952	2,200	2,062	1,832	1,492	1,382	
14	1,547	1,517	1,677	1,697	1,807	1,637	2,057	2,237	2,057	1,717	1,607	1,547
15	1,512	1,512	1,682	1,742	1,872	1,702	2,000	1,882	1,742	1,332	1,222	
16	1,682	1,682	1,832	1,842	1,902	1,702	2,092	2,192	2,092	1,852	1,792	1,732
17	1,477	1,447	1,547	1,567	1,637	1,457	1,847	1,987	1,847	1,567	1,527	1,477
18	1,582	1,552	1,812	1,852	2,022	1,872	2,362	3,102	2,852	2,332		
19	1,727	1,647	1,917	1,957	2,137	1,977	2,527	2,847	2,547	1,987	1,857	1,787
20	2,827	2,757	3,017	3,067	3,237	3,097	3,627	3,957	3,677	3,097	2,967	2,887
21	1,897	1,837	2,117	2,057	2,337	2,157	2,727	3,007	2,737	2,167	2,027	1,937
22	1,882	1,812	1,922	2,042	2,182	2,042	2,350	2,752	2,562	2,562	2,452	
23		3,441	3,651	3,571	3,881	3,731	4,191	4,481	4,251	4,251	3,651	3,591
24		2,263	2,633	2,703	2,843	2,673	3,050	3,623	3,433	2,843	2,637	
25		2,277	2,627	2,757	2,947	2,787	3,317	3,637	3,427	2,817	2,308	2,065
26		1,848	2,188	2,323	2,478	2,278	2,650	3,288	3,028	2,418	2,308	
27		1,735	2,085	2,215	2,375	2,225	2,500	3,125	2,875	2,365	2,185	2,065
31	1,806	1,766	1,896	1,986	2,106	1,936	2,200	2,136	2,086	1,846	1,766	
32	1,921	1,881	1,071	1,211	2,211	2,141	2,371	2,571	2,451	2,181	2,081	
33	1,706	1,736	1,886	1,936	2,096	1,906	2,176	2,266	2,196	1,966		
34		2,361	2,711	2,871	3,041	2,841	3,561	3,681	3,411	2,991	2,841	
35		2,558	2,858	2,988	3,138	2,908	3,558	3,748	3,698	3,118	2,938	
36		2,65	3	3,14	3,22	3,07	3,600	3,89	3,84	3,47	3,34	
37		2,922	3,302	3,392	3,502	3,342	4,092	4,462	4,292	3,542	3,322	3,172
38		1,814	2,174	2,314	2,484	2,204	3,104	3,604	3,364	2,614	2,314	2,164
39		1,89	2,36	2,36	2,43	2,2	2,600	3,34	3,1	2,68	3,57	
70	1,478	0,458	0,638	0,758	0,828	0,658	0,980	1,798	1,698	1,358	1,258	
72	1,836	1,816	2,016	2,086	2,216	2,066	2,406	2,546	2,396	2,006	1,926	1,866
73	1,828	1,828	2,028	2,138	2,268	2,118	2,400	2,408	3,318	2,918	2,848	
75		2,716	2,826	2,986	3,176	3,068	3,300	3,386	3,306	2,776	2,686	
89		2,53	2,76	2,84	2,91	2,74	3,140	3,25	3,11	2,69	2,58	1,47
91		1,763	1,933	1,993	2,153	2,003	2,300	2,773	2,593	2,113	2,033	
92		1,775	1,925	2,165	2,225	2,065	2,435	2,545	2,455	1,945	1,855	
93		1,732	1,902	1,952	2,072	1,912	2,250	2,452	2,412	1,962	1,832	
94	2,117	2,037	2,287	2,357	2,517	2,287	2,867	3,177	2,947	2,377	2,267	2,187
M1	1,502	1,502	1,532	1,542	1,552	1,532		1,642	1,582	1,532	1,522	1,512
M2	1,469	1,469	1,509	1,529	1,509	1,484		1,609	1,569	1,529	1,489	1,489
M4	1,532	1,532	1,552	1,572	1,572	1,552		1,672	1,652	1,672	1,681	1,692
M5	0,971	0,971	1,001	1,861	1,901	1,871		2,041	1,991	1,961	1,941	1,891
M6								1,662	1,602	1,532	1,542	1,532
M7								2,221	2,191	2,151	2,141	2,121
M8								2,182	2,152	2,102	2,082	2,072
M9								2,394	2,384	2,344	2,334	2,324
M10								2,486	2,476	2,416	2,406	2,396
M11								2,104	2,094	2,044	2,044	2,034
M12								0,404	1,439	1,389	1,399	1,379
M13								1,774	1,764	1,724	1,724	1,724

Como pode ser observado nas Tabelas 5 e 6, o mês de maio de 1999 foi o que teve o monitoramento mais completo, isto é, foram observados praticamente todos os piezômetros distribuídos em toda a área do Bessa. Por este motivo, o modelo foi calibrado no regime permanente para este mês, obtendo-se a distribuição da *condutividade hidráulica horizontal* que melhor representasse as características do solo. Após obter uma calibração satisfatória para este período, o modelo foi então calibrado para o mês inicial da campanha de medição (novembro de 1998) mantendo a condutividade hidráulica e ajustando as cargas hidráulicas fixas. Em seguida calibrou-se o modelo no tempo transiente, empregando ao invés de cargas fixas, cargas especificadas variantes no tempo, calibrando a *porosidade eficaz* e uma *recarga* em função da precipitação. A calibração mais satisfatória foi obtida retirando as cargas hidráulicas fixas especificadas e calibrando poços e drenos de acordo com o comportamento do aquífero observado através das medições (Marques, 2004). A Figura 44 apresenta a distribuição espacial dos piezômetros na área de estudo, bem como as isolinhas potenciais referentes às medições de Maio de 1999, utilizadas nesta pesquisa.

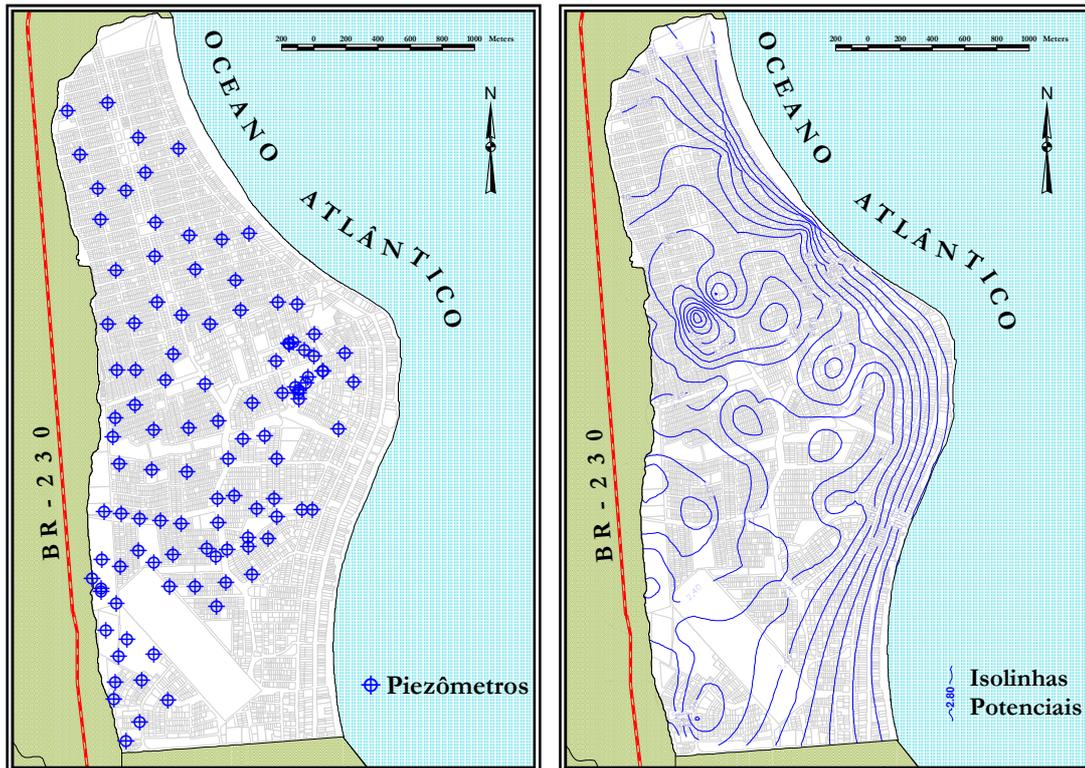


Figura 44 – Distribuição espacial dos piezômetros instalados e isolinhas potenciais observadas em maio de 1999.

Pode-se verificar através da modelagem espacial realizada, que a profundidade do aquífero foi obtida a partir da diferença algébrica entre os valores da altimetria do terreno e os valores de nível do lençol freático. A Figura 45 apresenta estes valores espacializados para a área de estudo.

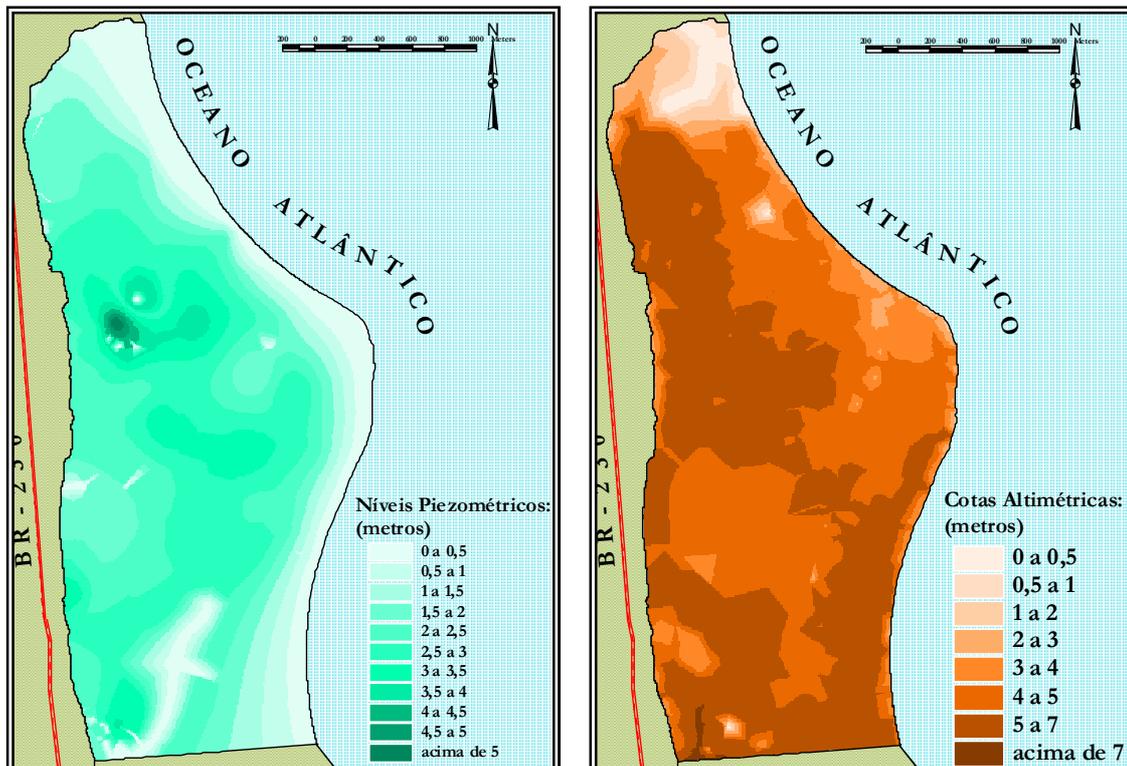


Figura 45 – Níveis piezométricos (maio de 1999) e Modelo Numérico do Terreno

Para a obtenção do Modelo Numérico do Terreno (MNT), foi gerada uma grade irregular triangular (TIN). Na modelagem da superfície por meio de grade irregular triangular, cada polígono que forma uma face do poliedro é um triângulo. Os vértices do triângulo são geralmente os pontos amostrados da superfície. Este tipo de modelagem permite que informações morfológicas importantes, como as discontinuidades representadas por feições lineares de relevo (cristas) e drenagem (vales), sejam consideradas, possibilitando, assim, modelar a superfície do terreno preservando as feições geomórficas da superfície. Em seguida, esta grade irregular foi transformada em uma grade *regular* (GRID) para que fosse possível sua utilização através de álgebra de mapas (operações realizadas célula a célula). Esta grade regular, bem como *todas* as grades regulares utilizadas neste trabalho, foi gerada com uma resolução espacial de 5 metros, ou seja, as células que compõem estas grades possuem 5 x 5 metros de tamanho e, portanto, as informações (declividades, profundidades, distâncias, etc.) a elas associadas possuem este nível de detalhamento. A profundidade do aquífero, obtida através de uma operação algébrica de subtração entre os mapas da Figura 45, (MNT – Nível), é apresentada na Figura 46.

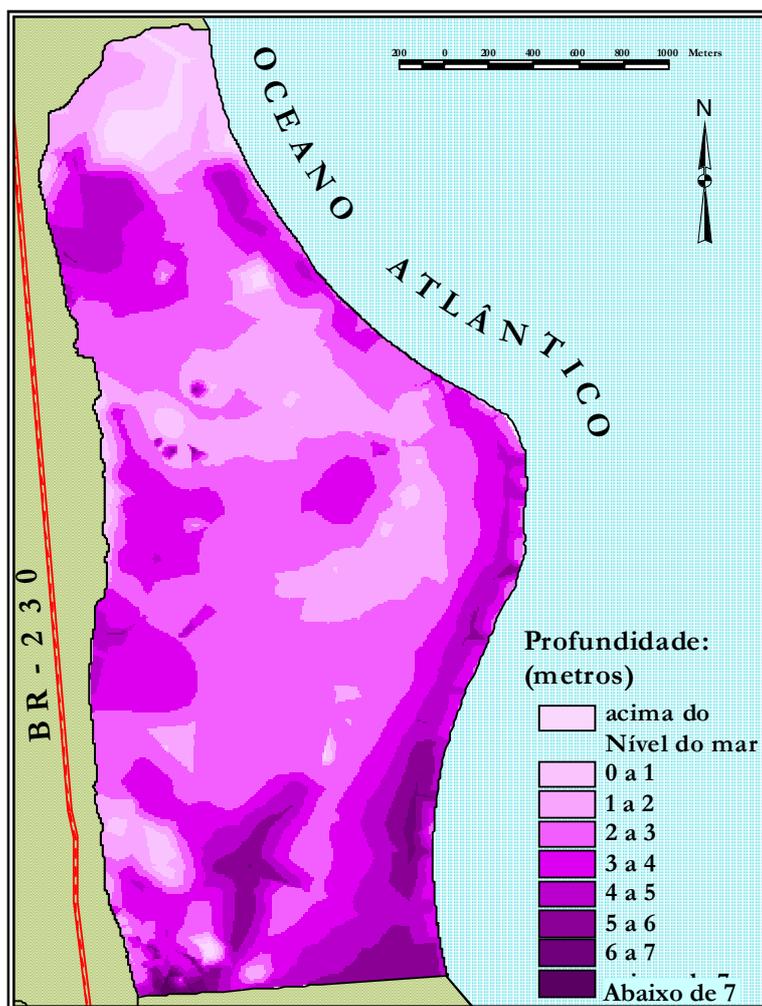


Figura 46 – Mapa de profundidade do aquífero freático do bairro do Bessa.

* Declividades do Terreno

Declividade é a inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal. Considerando um modelo numérico do terreno de dados altimétricos como o da Figura 45 e traçando um plano tangente a esta superfície num determinado ponto (P), a declividade em P corresponderá à inclinação deste plano em relação ao plano horizontal. A *derivação* da declividade a partir de um modelo altimétrico é uma função usual da maioria dos SIGs. A Figura 47 apresenta as declividades obtidas a partir do MNT gerado.

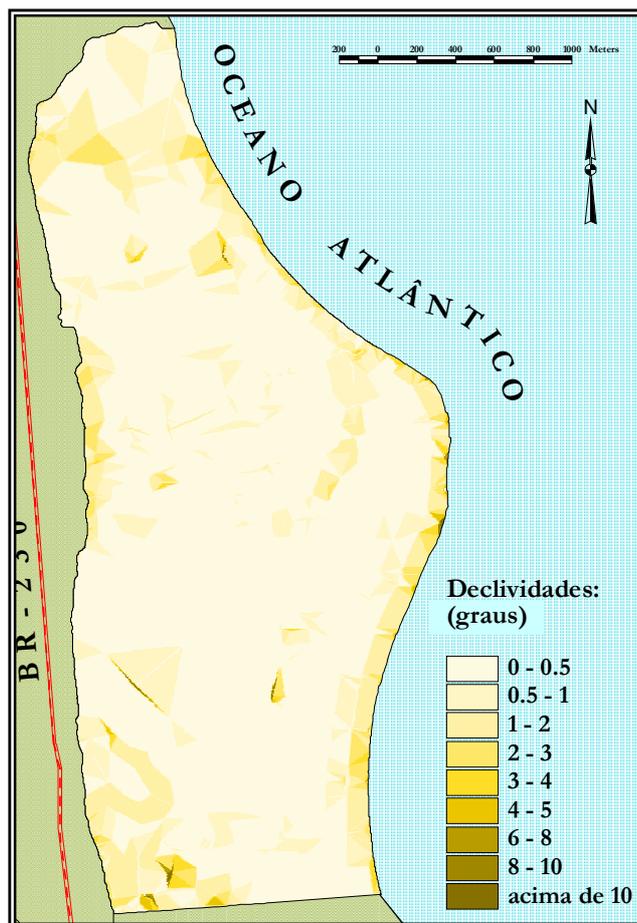


Figura 47 – Mapa de declividades do bairro do Bessa.

* Distância aos corpos hídricos

Uma informação muito considerada pelos especialistas para a tomada de decisão em alguns aspectos foi a distância aos corpos hídricos. De maneira especializada essa informação pode ser obtida a partir de um operador de distância presente na maioria dos SIGs. Este tipo de operação gera, a partir de objetos selecionados, as distâncias a estes objetos. Estas distâncias são calculadas para cada célula (formato raster) de forma a obter-se um mapa, com a distância aos objetos selecionados, distribuída de forma contínua ao longo do mapa. A partir da representação espacial dos corpos hídricos do bairro do Bessa foi gerado o mapa de distâncias utilizado nesta pesquisa (Figura 48).

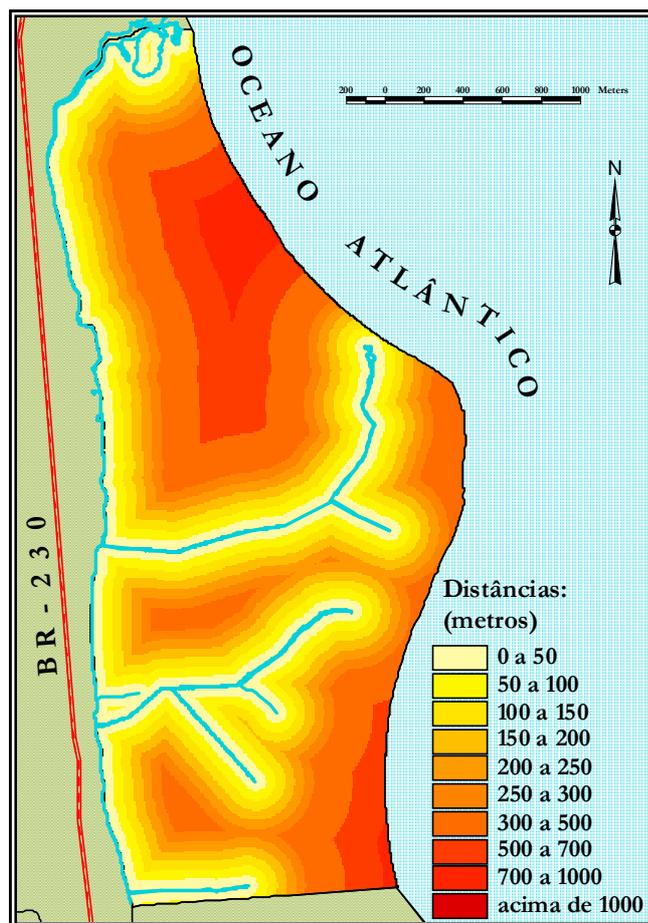


Figura 48 – Mapa de distâncias aos corpos hídricos no bairro do Bessa.

* Uso do Solo

Como já foi citado, as alternativas de gestão modeladas nesta pesquisa consideram os aspectos hidrológicos do bairro do Bessa no contexto urbano em que eles estão inseridos. Nesse sentido, o conhecimento do uso do solo urbano é imprescindível em quase todas as análises. Estes mapas (Figura 49) foram gerados a partir dos dados armazenados no cadastro multifinalitário da Prefeitura de João Pessoa e associados ao Mapa Urbano Digital (MURBD) do município.

* Permeabilidade

A permeabilidade do bairro foi considerada a partir dos dados de ocupação urbana (áreas edificadas consideradas impermeáveis e áreas livres consideradas permeáveis). Entretanto a informação referente às vias de acesso e suas condições de pavimentação também foram verificadas para a construção deste mapa. Neste sentido, a Figura 50 apresenta o mapa das vias de acesso, elaborado a partir das informações do cadastro multifinalitário e o mapa de permeabilidade obtido a partir da sobreposição das áreas edificadas e das vias pavimentadas em um único plano de informação.

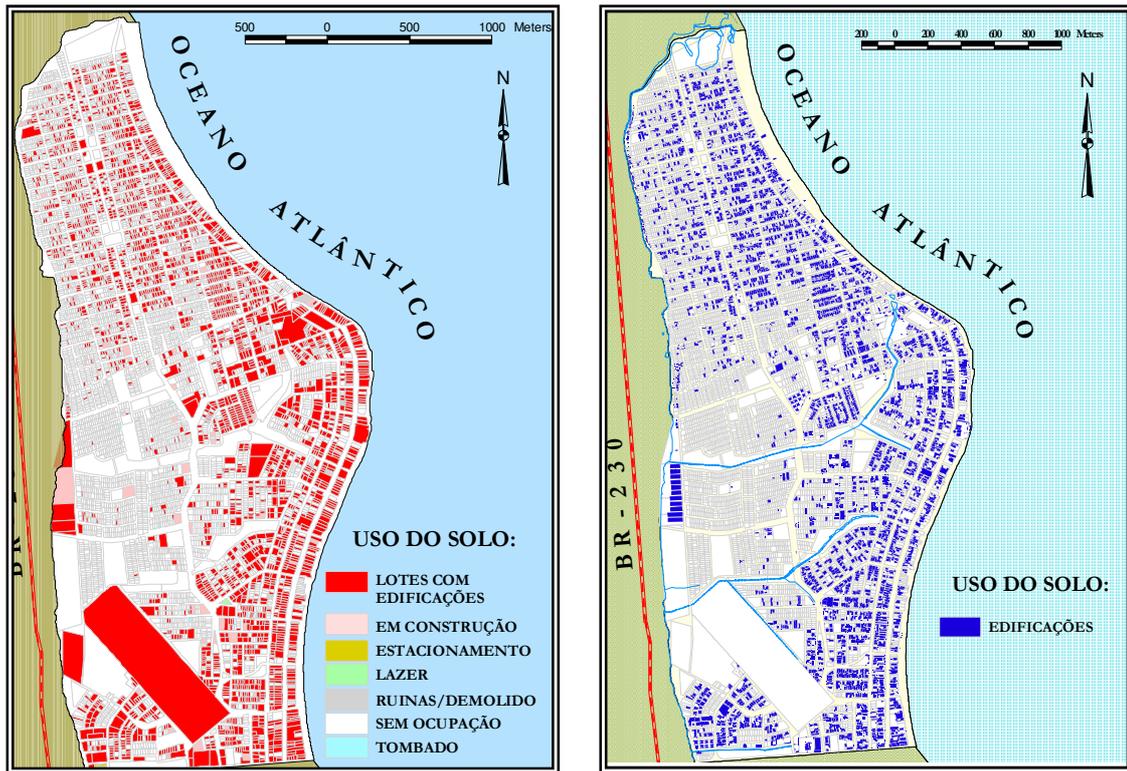


Figura 49 – Uso do solo no bairro do Bessa (elaborado a partir de SEPLAN, 2000).

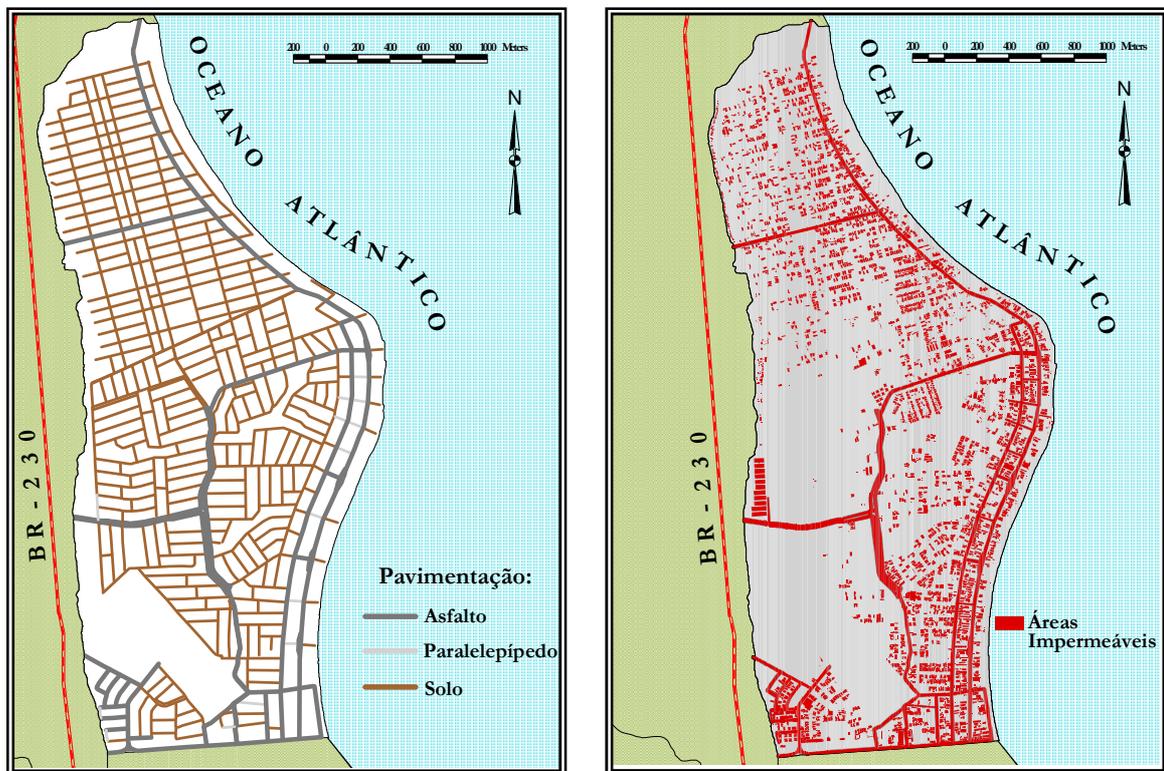


Figura 50 – Vias de acesso e permeabilidade do bairro do Bessa.

* Restrições Legais

A representação de restrições de ocupação urbana estabelecidas em Lei referentes à área em estudo se configura em dois planos de informação. O primeiro deles diz respeito às faixas marginais aos corpos hídricos existentes e pode ser obtido a partir do mapa da Figura 48 (distância aos corpos hídricos). O segundo plano de informação, extraído diretamente do plano diretor, diz respeito às zonas especiais de preservação (ZEP) inseridas no bairro do Bessa (Figura 51).



Figura 51 – Áreas de preservação permanente (Plano Diretor).

Capítulo 5

Resultados: Análises e Discussões

Os resultados apresentados neste capítulo referem-se aos planos de informação resultantes da modelagem espacial desenvolvida no Capítulo 4. As alternativas de gestão (A,B,C e D), discutidas anteriormente, são apresentadas, através dos planos de informação espaciais que correspondem à modelagem e representação de todos os conhecimentos que estas envolvem. Segue-se à apresentação dos resultados obtidos, uma análise inicial dos mesmos, sob diversos aspectos (dependendo do tipo de conhecimento abordado), tais como: validade dos resultados, problemas na implementação, análise de sensibilidade, etc.

5.1. Alternativa “A”: Susceptibilidade a Alagamentos

Para obter um diagnóstico do bairro sob o ponto de vista da susceptibilidade a alagamentos várias operações foram necessárias, incluindo duas análises multicriteriais agregando preferências e ponderações baseadas em conhecimento especializado. Inicialmente a Figura 52 apresenta o critério restritivo utilizado na primeira destas análises multicritério. É sabido através do conhecimento da área de estudo que as ruas pavimentadas no bairro sofrem muito pouco os problemas de alagamento. Por este motivo, a análise se restringiu aos lotes ocupados (incluindo os que estão em fase de construção) situados em ruas não pavimentadas.

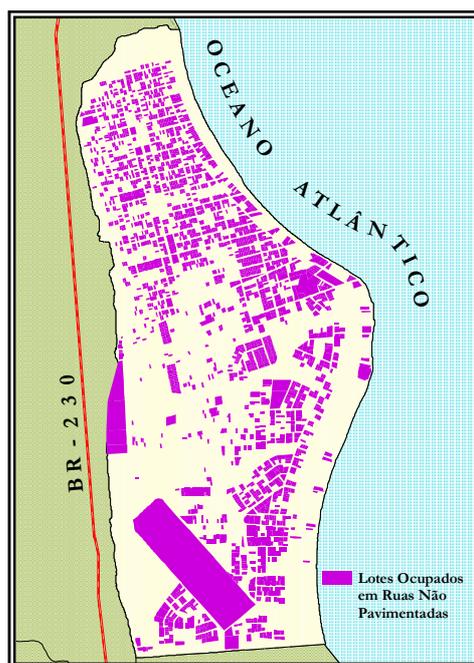


Figura 52 – Lotes ocupados em vias não pavimentadas do bairro do Bessa

Vale salientar que a ocupação urbana é um fenômeno extremamente dinâmico e que os lotes considerados “ocupados”, referem-se a uma data específica correspondente ao levantamento destes dados por parte da Prefeitura Municipal de João Pessoa (2000). Um outro fator de imprecisão deste plano de informação pode ser observado em alguns lotes situados em esquinas, ou um mesmo lote com frente e fundo para ruas distintas, os quais, atenderam positivamente ao critério de consulta espacial “localizado em ruas não pavimentadas”, mesmo quando os mesmos possuíam apenas uma de suas faces situadas em ruas sem pavimentação. Uma verificação “in loco” ou um nível maior de detalhe das informações, como a identificação da testada frontal de cada lote para atribuir-lhe pertencer ou não a uma rua, poderia melhorar a precisão destas informações.

Os critérios de adequação para esta análise multicriterial, a saber: *Profundidade do Aquífero*, *Declividades e Distâncias aos Corpos Hídricos* foram apresentados nas Figuras 46, 47 e 48. A incerteza associada a estes planos de informação está relacionada principalmente com os métodos de interpolação utilizados na sua geração, haja vista que se tratam de fenômenos contínuos obtidos através de amostras pontuais no espaço. Entretanto, para que estes planos de informação sejam combinados, faz-se necessário transformá-los para uma mesma unidade de medidas, em função da adequação de cada critério à hipótese formulada (metros de profundidade não podem ser somados com graus de declividade, os quais, não podem ser subtraídos de metros de distância, por exemplo).

Utilizando-se conjuntos difusos ou nebulosos (fuzzy) pode ser analisada a possibilidade de cada célula pertencer a uma função de pertinência estabelecida. Os conjuntos difusos se caracterizam por não possuírem limites definidos e a transição entre a pertinência ou não pertinência de uma posição é gradual. Geralmente, em Sistemas de Informação Geográfica, as seguintes funções de pertinência são consideradas: a sigmoideal (forma de “s”), a forma de “j”, e a função linear. Neste trabalho, um conjunto difuso é caracterizado pelo grau de pertinência (também chamado de grau de adequação) que varia de 0 a 100, indicando um aumento contínuo de uma situação de não pertinência para uma de total pertinência. Ou seja, considerando que as áreas *mais* rasas serão as *mais* adequadas à hipótese formulada, (áreas mais susceptíveis a alagamentos), para o plano de informação *Profundidade*, tem-se a seguinte função linear monotonicamente decrescente (Figura 53):

$$y = -10,21x + 76,78.$$

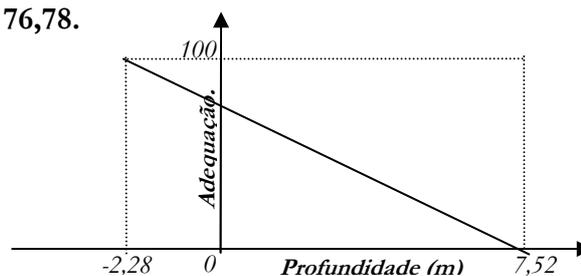


Figura 53 – Função linear monotonicamente decrescente para o critério “profundidade” (Alternativa A, item A.1).

Considerando que áreas com declividades muito baixas estão muito mais suscetíveis a alagamentos, encontra-se a seguinte função de adequação para o critério *Declividades* (Figura 54):

$$y = - 7,48x + 100.$$

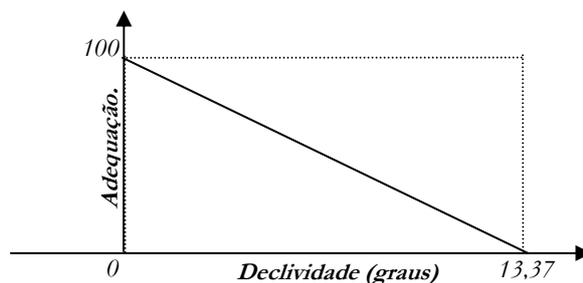


Figura 54 – Função linear monotonicamente decrescente para o critério “declividades” (Alternativa A, item A.1).

Os resultados das funções das Figuras 53 e 54, aplicados em todas as células dos planos de informação referentes aos valores de profundidade e declividade do bairro do Bessa, são apresentados na Figura 55. Para o critério declividade, por se tratar de uma planície costeira, grande parte da área apresenta valores muito altos de adequação à hipótese formulada.

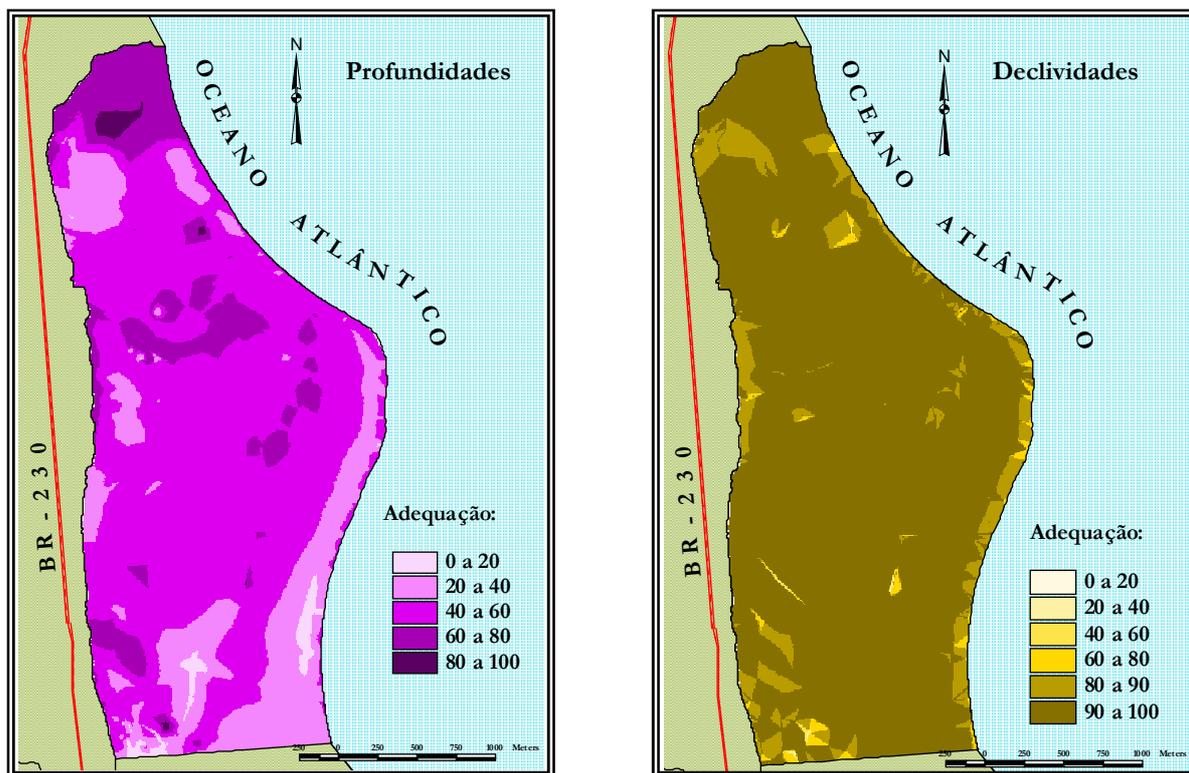


Figura 55 – Mapas de profundidade e declividade reclassificados para o intervalo de 0 a 100, segundo uma função linear monotonicamente decrescente.

Outro critério considerado na modelagem foi a distância aos corpos hídricos (Figura 48), admitindo-se que se um lote estiver muito próximo de um corpo hídrico ele possui um risco maior de ser atingido por algum alagamento em períodos chuvosos, ou seja, quanto mais distante de um corpo hídrico, mais adequado à hipótese formulada. Sendo assim, este plano de informação deve ser

submetido a uma função linear monotonicamente decrescente (Figura 56) para obter-se valores adequados à análise (Figura 57).

$$y = -0,067x + 100$$

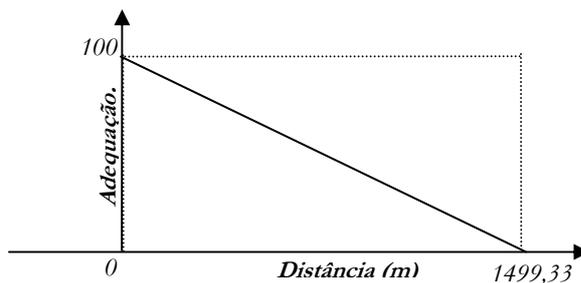


Figura 56 – Função linear monotonicamente decrescente para o critério “distância aos corpos hídricos” (Alternativa A, item A.1).

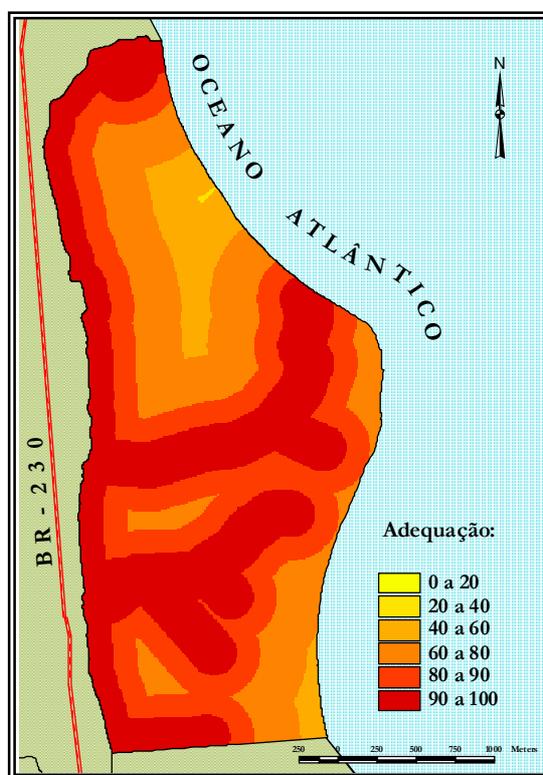


Figura 57 - Mapa de distâncias aos corpos hídricos reclassificado para o intervalo de 0 a 100, segundo uma função linear monotonicamente decrescente.

A análise multicriterial realizada a partir destes planos de informação caracteriza uma combinação ponderada entre os critérios de adequação (Figuras 55 e 57), em uma porção urbana limitada pelo critério restritivo estabelecido (Figura 52). Os pesos para efetuar esta ponderação foram obtidos a partir de métodos heurísticos, junto à equipe de gestão e, a representação algébrica desta análise é apresentada a seguir.

$$\left[0,40 \times [\text{Profundidades}] + 0,30 \times [\text{Declividades}] + 0,30 \times [\text{Distâncias aos CH}] \right] \times \left[\begin{array}{l} \text{Lotes} \\ \text{Ocupados em} \\ \text{Ruas não} \\ \text{Pavimentadas} \end{array} \right]$$

O resultado obtido é um plano de informação que representa as áreas ocupadas com maior risco de alagamento variando em valores de atendimento aos critérios e preferências estabelecidos que vão de 0 a 100. Os lotes com maior susceptibilidade a alagamento são os que apresentam os maiores valores de adequação (Figura 58).

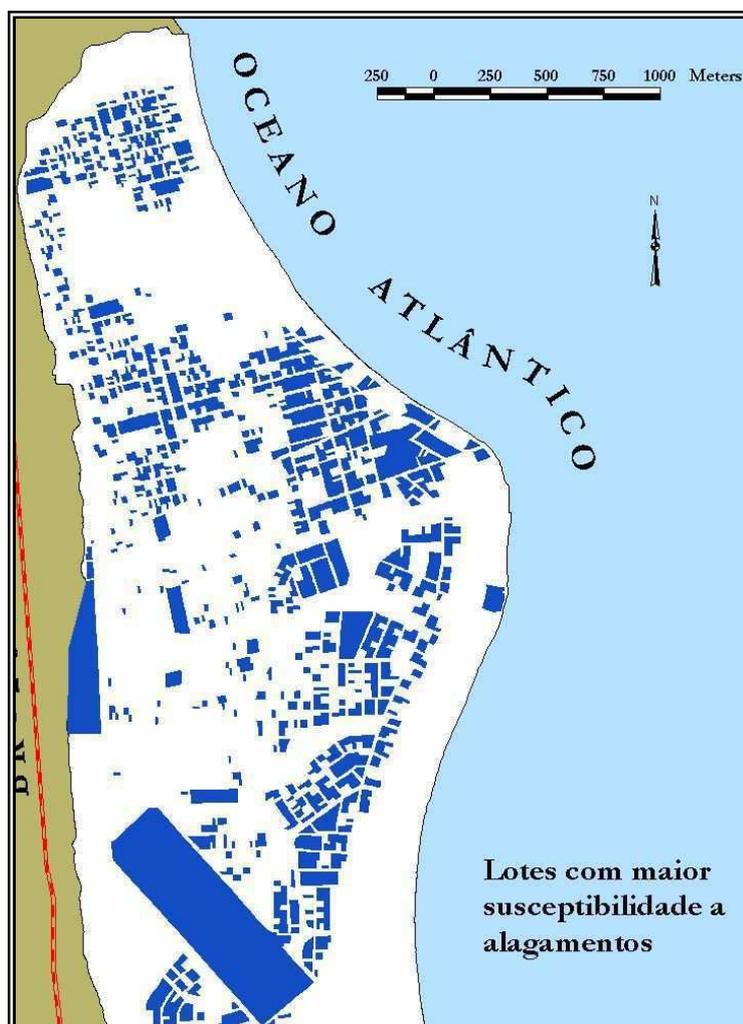


Figura 58 – Lotes ocupados com maior risco de alagamento (Alternativa A, item A.1).

Na alternativa A, também é sugerida uma avaliação de lotes cujas proximidades alagam, caracterizando uma situação que nesta abordagem foi chamada de “risco de ilhas”. Esta situação, muito comum em algumas áreas do bairro, faz com que os lotes localizados em áreas que normalmente não alagam, sejam prejudicados pelo fato de todos os acessos mais próximos estarem susceptíveis a alagamentos. Estes lotes seriam tão desvalorizados economicamente quanto os lotes citados na análise anterior e apresentados na Figura 58.

Para realizar esta avaliação, áreas com cotas de profundidade do aquífero menores que 3 (três) metros são consideradas muito rasas e, portanto, áreas potenciais de alagamento. Através de uma

operação de contingência é possível identificar os lotes que estão “completamente contidos” nestas áreas ilhadas e selecioná-los (Figura 59).

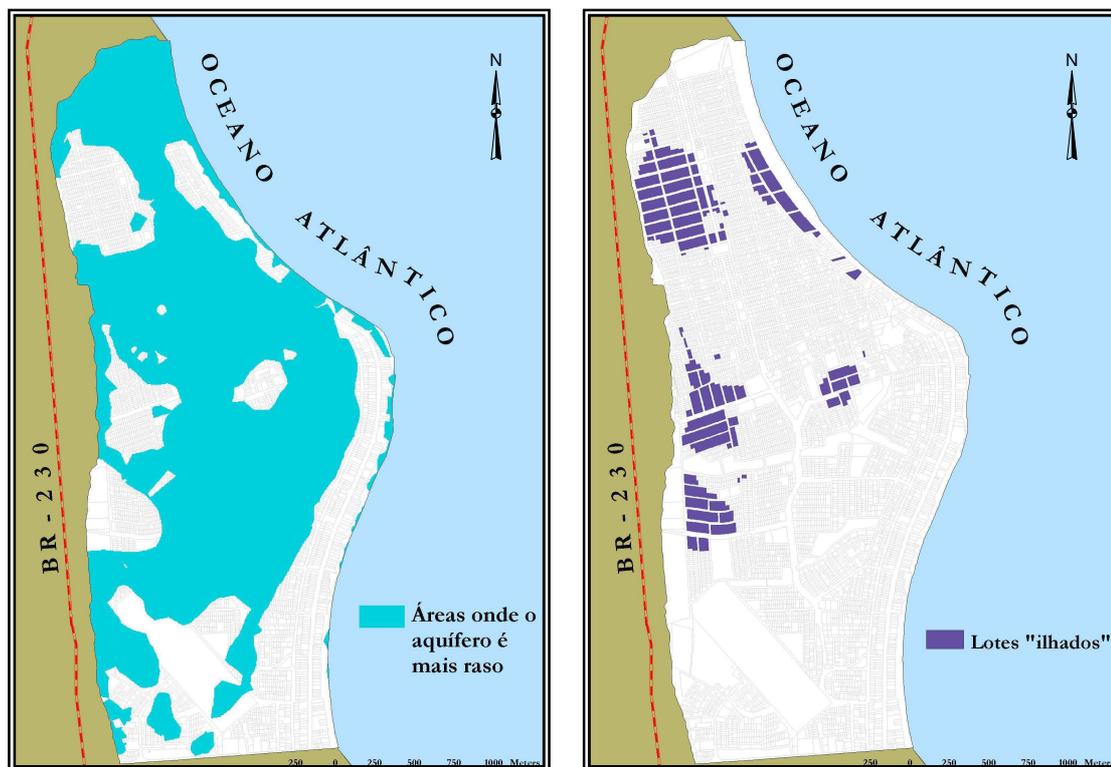


Figura 59 – Áreas com cotas de profundidade menores que 3 (três) metros e lotes considerados completamente “ilhados”.

Na avaliação das áreas desocupadas para a atribuição de um “conceito” que denote as *melhores* áreas a serem ainda ocupadas no bairro, uma nova avaliação multicriterial foi sugerida na modelagem. Inicialmente, algumas informações foram extraídas da legislação vigente para a elaboração de restrições legais de uso do solo urbano. As áreas de preservação permanente previstas em Plano Diretor encontram-se apresentadas na Figura 51. Somam-se a estas, as áreas marginais aos corpos hídricos, que também são protegidas por Lei. A Figura 60 apresenta a configuração espacial desta faixas marginais, obtida a partir da utilização de operadores de distância e geração de “buffers” (áreas de influência determinadas com base em uma distância especificada), além do plano de informação resultante que representa todas as restrições legais consideradas. No contexto desta avaliação também são considerados critérios de proximidade às vias de acesso principais do bairro, como um fator que agrega valor ao lote, no sentido de que os “melhores” lotes também são aqueles de maior facilidade de acesso em qualquer que seja a situação, principalmente em períodos de alagamento. A Figura 61 apresenta um plano de informação obtido a partir da utilização de operadores de distância sobre as vias pavimentadas do bairro.

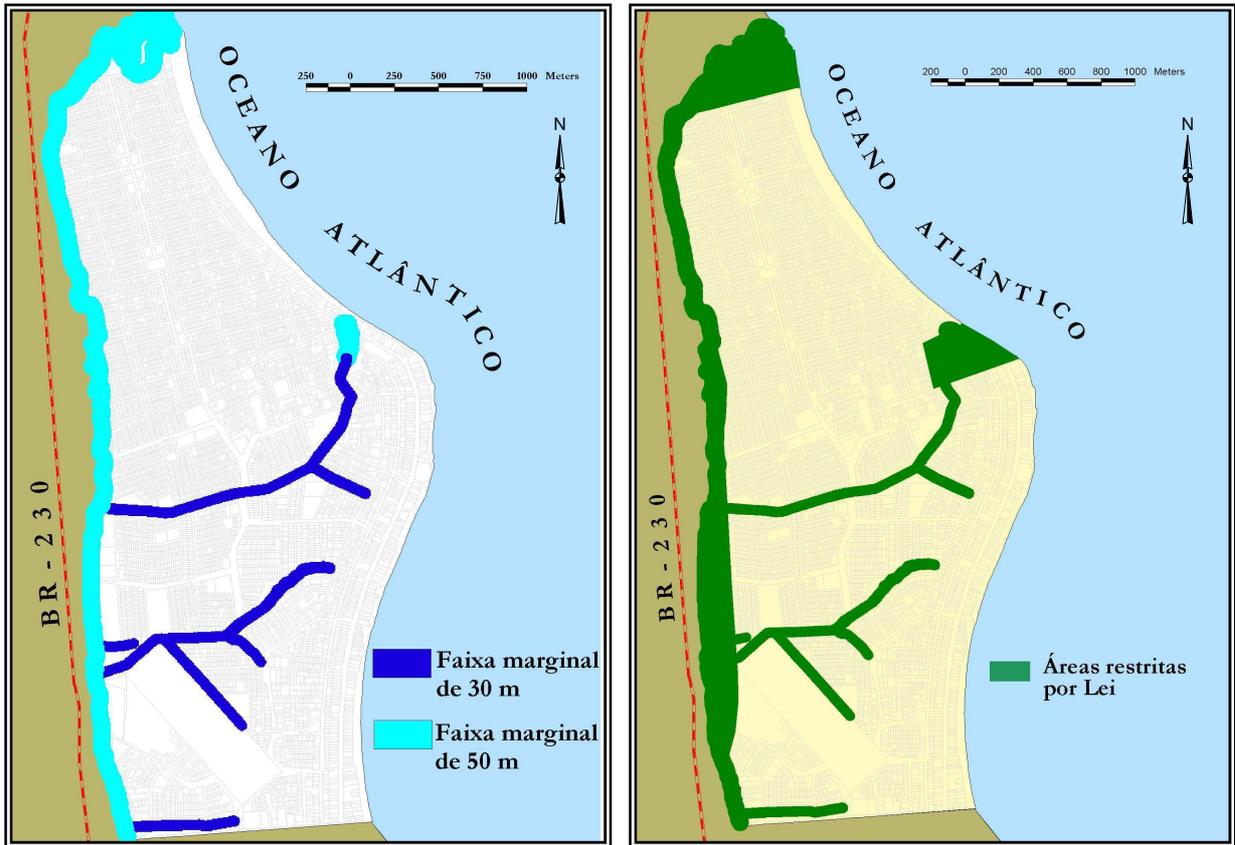


Figura 60 – Restrições de ocupação previstas em Lei (Alternativa A, item A.3.)

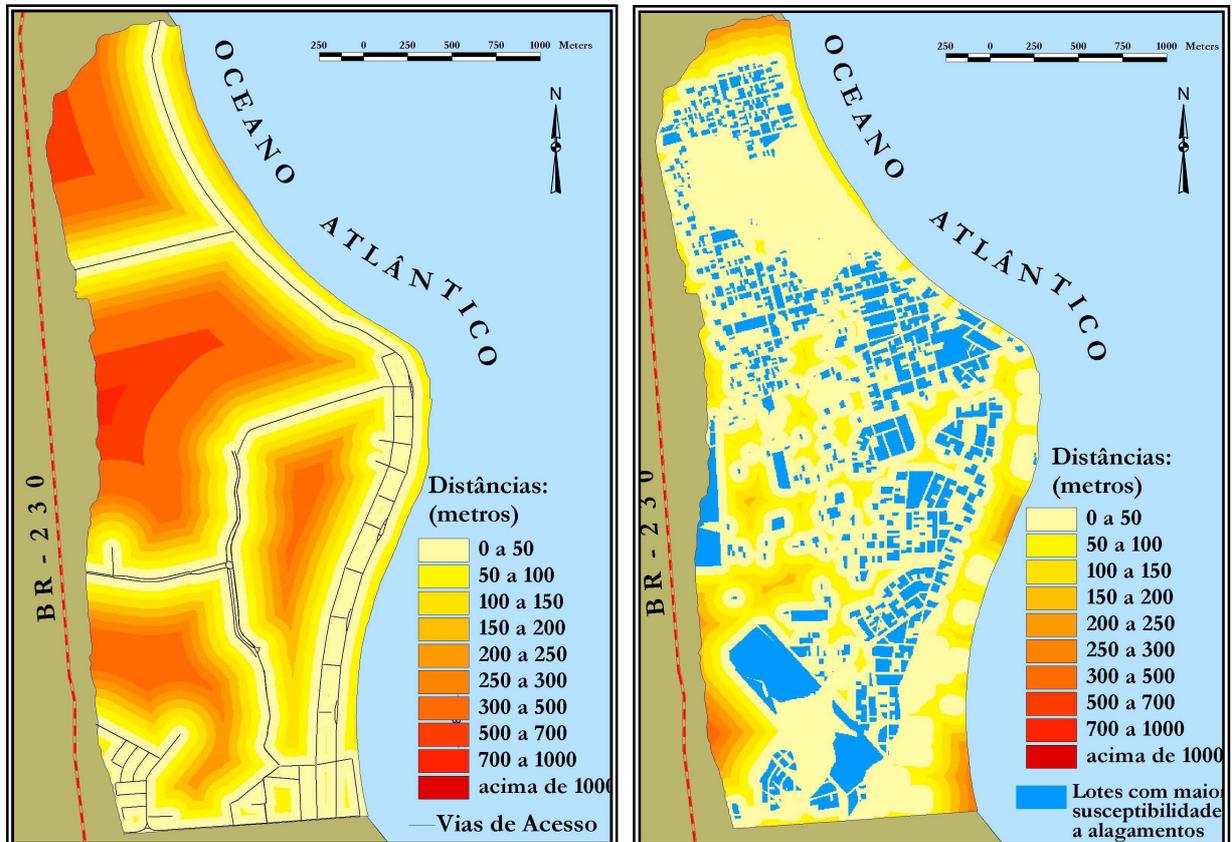


Figura 61 – Mapas de distâncias às vias de acesso e mapa de distâncias aos lotes ocupados com maior susceptibilidade a alagamentos

A modelagem também estabelece que a proximidade aos lotes ocupados com grande risco de alagamento (obtido anteriormente) é um critério importante, à medida que os melhores lotes devem se localizar o mais distante possível destas áreas (Figura 61).

A análise multicriterial representada na Figura 31 (modelagem espacial) deve resultar em um plano de informação que expresse, através de valores variáveis entre 0 e 100, as melhores áreas do bairro para ocupação. São considerados nesta análise 5 (cinco) critérios de adequação e 2 (dois) critérios restritivos, os quais são: *Distância aos lotes ocupados com maior risco de alagamento*, *Distância às ruas pavimentadas*, *Profundidade do aquífero*, *Declividade*, *Distância os corpos hídricos*, (Figuras 61, 46, 47 e 48 respectivamente) e as restrições: *Risco de Ilhas e Restrições Legais de Ocupação* (Figuras 59 e 60, respectivamente). Assim como na análise anterior, um conjunto difuso é utilizado para atribuir a cada critério um grau de pertinência (também chamado de grau de adequação) variando de 0 a 100 (para cada célula), indicando um aumento contínuo de uma situação de não pertinência para uma de total pertinência à condição estabelecida. No caso do plano de informação *Distância aos lotes ocupados com maior risco de alagamento* tem-se a seguinte situação: quanto mais distante de um lote ocupado com alta susceptibilidade a alagamentos menos provável que o usuário tenha que transitar por uma área alagada e menor o risco de um lote se encontrar alagado. Aplica-se então, a função monotonicamente crescente apresentada na Figura 62:

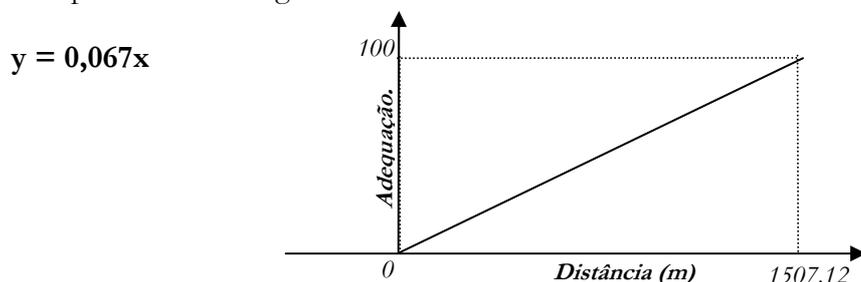


Figura 62 – Função linear monotonicamente crescente para o critério “distância aos lotes ocupados com maior risco de alagamento” (Alternativa A, item A.4).

Para as *Distâncias às ruas pavimentadas*, a modelagem considera que quanto mais próximo de um acesso pavimentado mais valorizado é o lote por ter seu acesso facilitado nos dias em que algumas áreas do bairro estejam alagadas. Esta consideração pode ser expressa pela seguinte função monotonicamente decrescente (Figura 63):

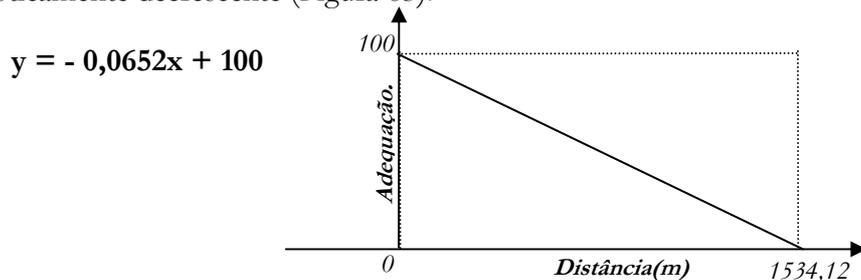


Figura 63 – Função linear monotonicamente decrescente para o critério “distância a vias pavimentadas” (Alternativa A, item A.4).

Ao contrário da análise anterior, para a hipótese formulada considera-se que os melhores lotes serão aqueles que se situam em áreas onde o aquífero é mais profundo. Portanto, este critério (*Profundidade*) deve ser submetido a seguinte função monotonicamente crescente (Figura 64):

$$y = 10,2x + 23,3$$

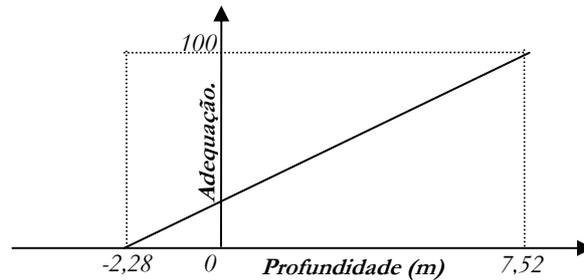


Figura 64 – Função linear monotonicamente crescente para o critério “profundidade” (Alternativa A, item A.4.).

De maneira análoga, as áreas com valores mais altos de declividade são consideradas com menor susceptibilidade a alagamentos, o que implica na seguinte função de adequação para este critério (Figura 65):

$$y = 7,48x$$

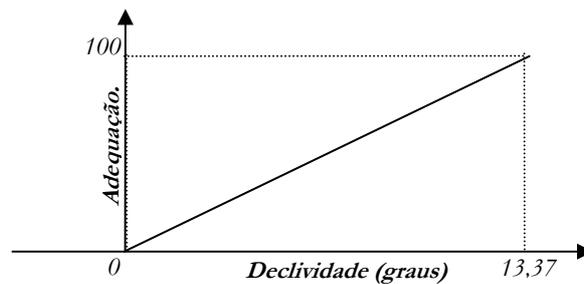


Figura 65 – Função linear monotonicamente crescente para o critério “declividade” (Alternativa A, item A.4.).

Para o critério *Distância aos corpos hídricos*, considera-se que quanto maior a distância de um lote a um corpo hídrico mais adequado à análise. Esta adequação pode ser expressa na seguinte função (Figura 66):

$$y = 0,067x$$

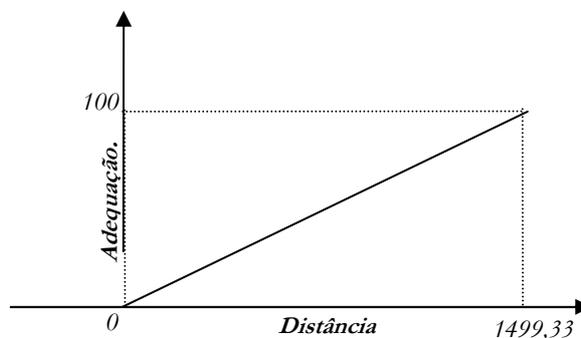


Figura 66 – Função linear monotonicamente crescente para o critério “distância aos corpos hídricos” (Alternativa A, item A.4.).

As Figuras 67, 68 e 69 representam os novos planos de informação obtidos a partir das operações realizadas (célula a célula) com as funções formuladas anteriormente para cada critério.

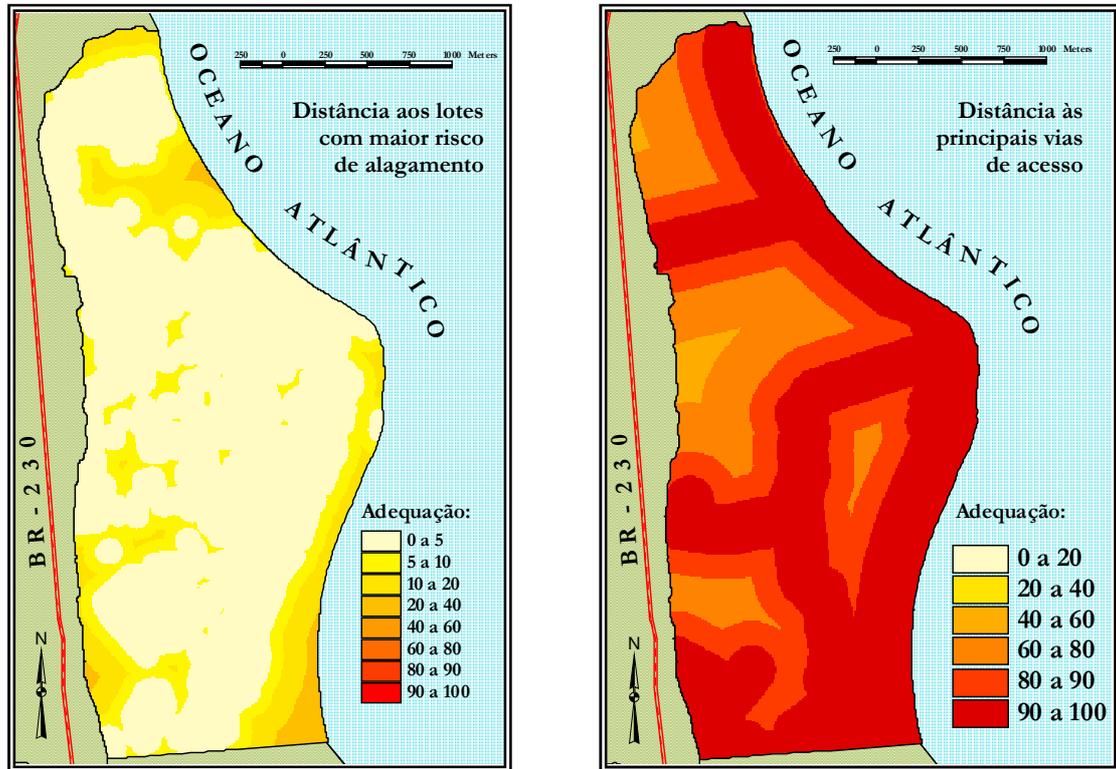


Figura 67 – Mapas de distâncias reclassificados para o intervalo de 0 a 100, segundo uma função linear monotonicamente *crescente* para os lotes potencialmente alagáveis e *decrecente* para as vias de acesso.

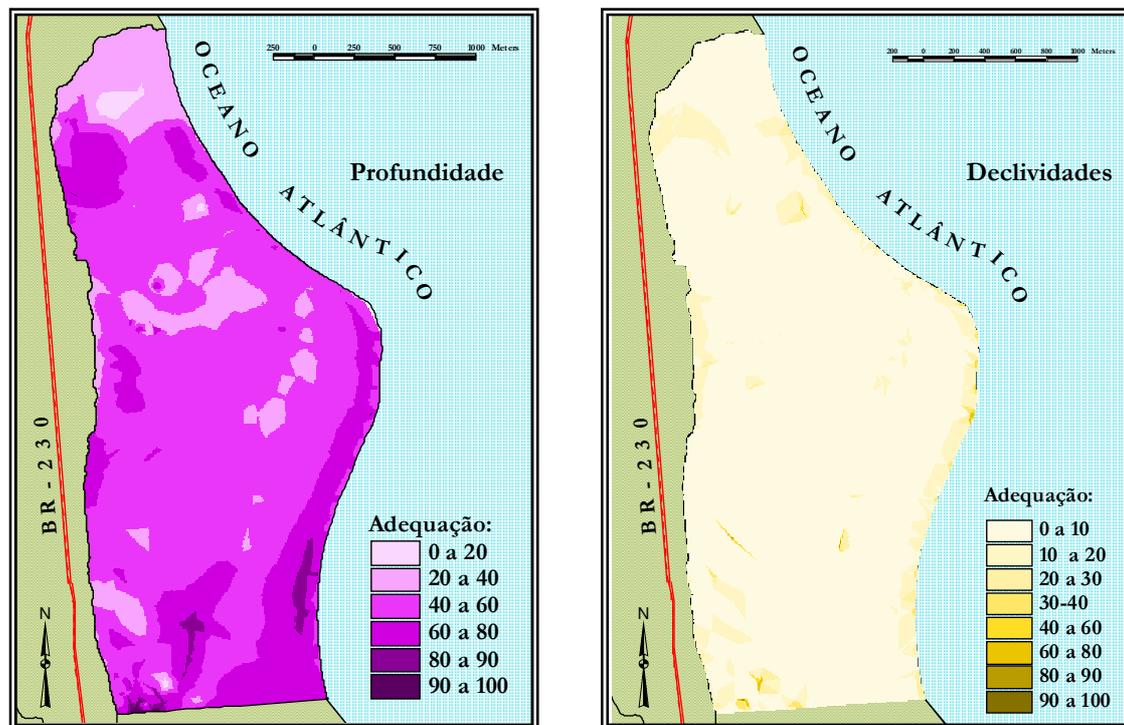


Figura 68 – Mapas de profundidade e declividade reclassificados para o intervalo de 0 a 100, segundo uma função linear monotonicamente *crescente*.

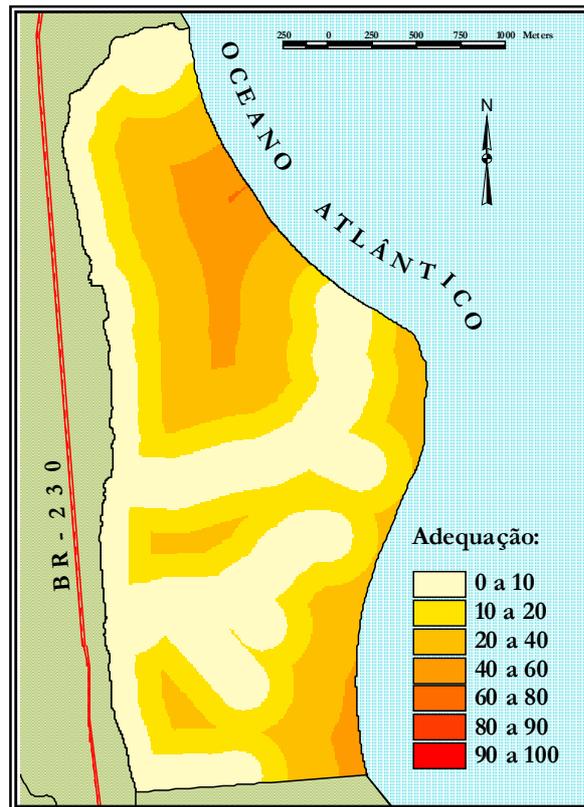


Figura 69 – Mapa de distância aos corpos hídricos reclassificado para o intervalo de 0 a 100, segundo uma função linear monotonicamente crescente.

Após a padronização de todos os critérios para uma escala contínua de adequação, os critérios restritivos podem ser reclassificados para imagens binárias com valores “0” e “1”. As células situadas nas áreas que atendem ao objetivo da análise devem apresentar valor igual a “1” e as demais células, valor igual a “0” (Lógica Booleana).

A análise multicriterial propriamente dita é realizada então utilizando-se o método de Combinação Linear Ponderada que consiste em multiplicar cada critério de adequação padronizado, por um peso correspondente e, em seguida, efetuar uma agregação (soma) entre estes critérios. O resultado deve ser multiplicado pelas restrições booleanas, eliminando assim as áreas que não atendem aos objetivos da análise em hipótese alguma. A representação algébrica desta combinação é apresentada pela expressão abaixo.

$$\left[0,15 \left(\begin{array}{c} \text{Distâncias aos} \\ \text{lotes com} \\ \text{maior risco de} \\ \text{alagamento} \end{array} \right) + 0,3 \left(\text{Profundidade} \right) + 0,2 \left(\text{Declividade} \right) + 0,2 \left(\begin{array}{c} \text{Distâncias aos} \\ \text{corpos hídricos} \end{array} \right) + \right. \\
 \left. + 0,15 \left(\begin{array}{c} \text{Distâncias às} \\ \text{Vias de Acesso} \end{array} \right) \right] \times \left[\left(\begin{array}{c} \text{Restrições} \\ \text{Legais} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Risco} \\ \text{de Ilhas} \end{array} \right) \right]$$

Uma das principais vantagens deste método é a capacidade de dar diferentes pesos relativos para cada um dos planos de informação no processo de agregação. Os pesos dos critérios, também denominados de pesos de compensação, são atribuídos a cada critério indicando a importância relativa de cada critério em relação aos demais e controlando como os critérios irão compensar-se uns com os outros. Desta maneira, critérios com alto grau de adequação em uma área podem compensar critérios com baixo grau de adequação na mesma área.

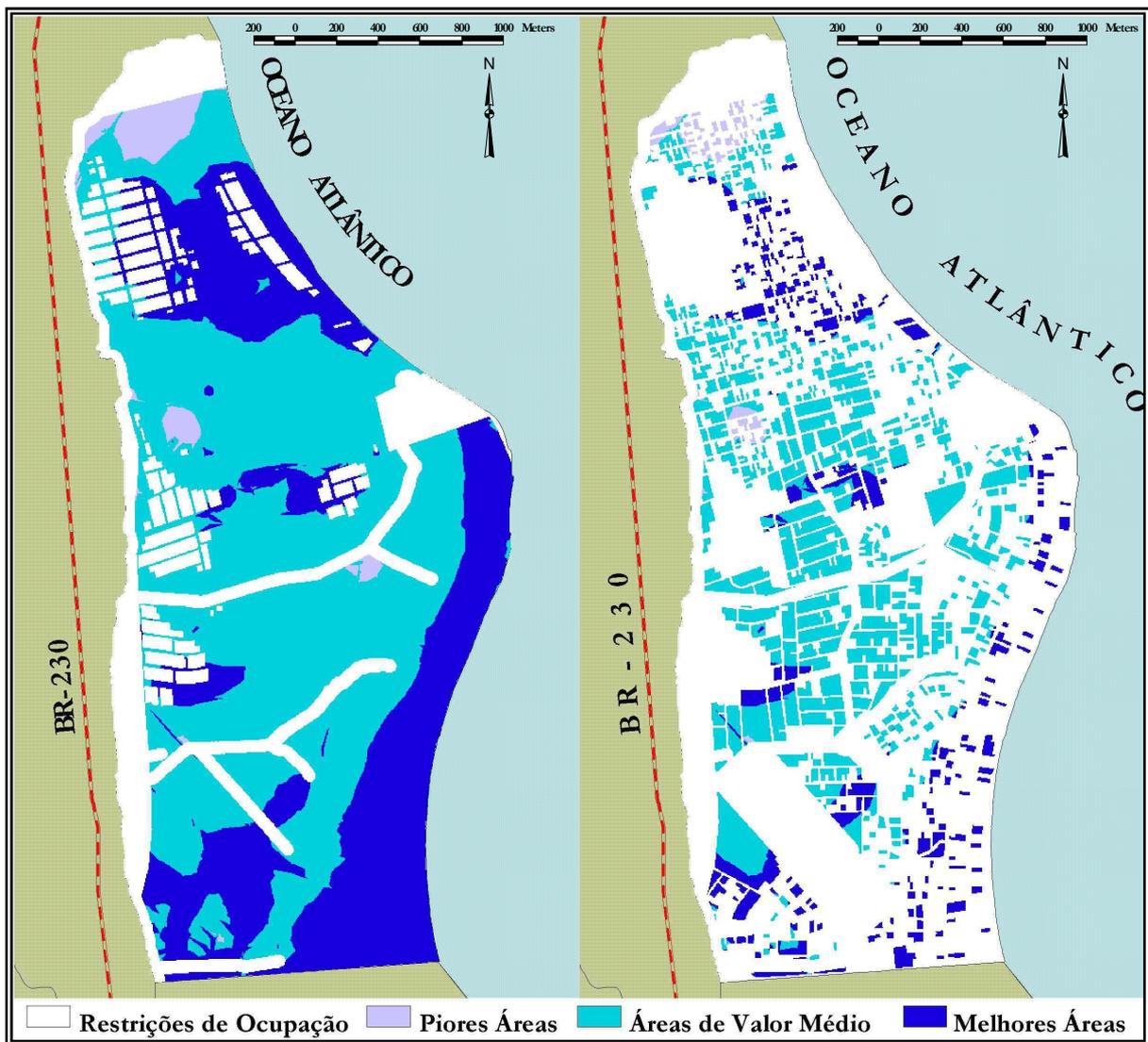


Figura 70 – Melhores áreas para ocupação. Lotes vazios sobrepostos às melhores áreas (resultado da análise multicriterial espacial).

A Figura 70 é o plano de informação resultante da análise multicriterial sugerida na modelagem. As seguintes considerações podem ser feitas sobre este resultado: (i) a figura à esquerda apresenta os valores obtidos para todas as áreas para as quais a análise foi realizada; (ii) a figura à direita é uma sobreposição dos lotes desocupados no bairro e identifica os melhores locais de ocupação (lotes que podem ser mais valorizados) sob o aspecto da susceptibilidade a alagamentos;

(iii) Com a restrição do risco de “ilhas”, alguns lotes que seriam classificados como “melhores”, são automaticamente excluídos da análise, confirmando a “intuição” dos especialistas que sugeriram tal análise pelo conhecimento de que muitas vezes alguns lotes não alagam mas ficam com seus acessos todos alagados, o que causa um transtorno equivalente aos causados pelos lotes realmente alagados;

(iv) Com base nesta classificação, o valor econômico de muitos dos terrenos ainda desocupados no bairro pode ser diferenciado de uma maneira mais justa.

É importante ressaltar que os conceitos atribuídos (“melhor”, “pior”, etc.) foram estabelecidos a partir de uma avaliação que considera alguns critérios específicos. A introdução de novos critérios ou de preferências e ponderações diferentes pode alterar significativamente a configuração dos resultados.

5.2. Alternativa “B”: Rebaixamento do Lençol

Esta alternativa se caracteriza pela simulação de um rebaixamento do lençol freático através do bombeamento de poços, cuja utilização e implantação seja facilmente justificada. Observa-se que existem vários poços ativos e desativados no bairro que não constam nos cadastros oficiais, portanto uma simulação poderia considerar estes poços em atividade. Além disso, novos poços podem ser construídos para atender usos como lavagem de carros e calçadas, áreas externas de condomínios, irrigação de jardins e canteiros públicos, etc.

Para simular o comportamento do aquífero sob condições de bombeamento foram realizadas algumas inferências sobre a localização destes possíveis poços. A maior parte destas inferências foi feita pelos especialistas consultados, diante da ausência ou incerteza de algumas informações. O conhecimento de alguns casos particulares foi utilizado como um dado amostral e extrapolado para todo o bairro de forma a obter-se uma aproximação da realidade a ser simulada. Por exemplo: nos estudos desenvolvidos no bairro observou-se que em algumas igrejas, em alguns edifícios e em algumas granjas ou residências de alto padrão existem poços, inclusive alguns em funcionamento. Simula-se a existência de poços em todas as igrejas, na maioria dos edifícios (os de maior demanda para justificar a implantação de um poço) e nos lotes considerados como referentes a granjas ou grandes residências (grande quantidade de áreas irrigáveis) e obtêm-se uma situação que pode ser uma realidade futura ou até presente (se o uso dos poços for estimulado) para todo o bairro.

A Figura 71 apresenta os primeiros planos de informação que representam as inferências citadas. Dependendo do tipo e do conteúdo da informação armazenada, os recursos de análise espacial de um SIG podem facilitar a simulação de diversas inferências sobre os dados ausentes.

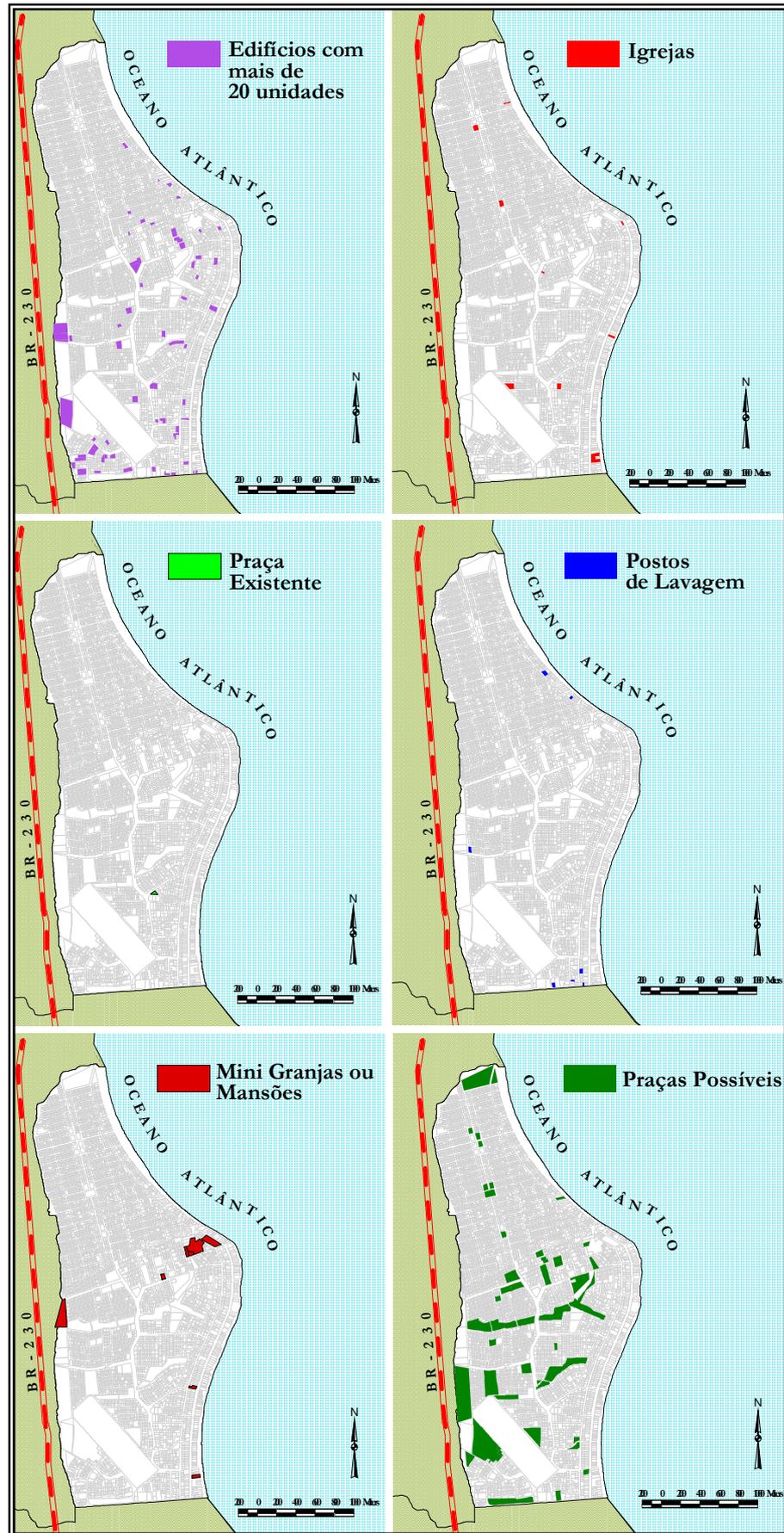


Figura 71 – Respostas às consultas para simular localizações de poços.

As operações exigidas na geração dos planos da figura anterior são descritas nos fluxogramas apresentados na modelagem espacial (Figuras 32 e 33). Alguns dados ausentes demandam maior esforço para sua representação, como é o caso da identificação dos lotes referentes às possíveis mini-granjas e residências de alto padrão, que exigem uma consulta envolvendo mais de um tema (ou plano de informação). A relação entre a área edificada e área do terreno estabelecida como critério para aferir ou não a condição de “granja” ou de “mansão” a um certo lote ($\text{Área_lote}/\text{Área_edif} \geq 7$), é determinada a partir do conhecimento da localização de algumas destas edificações por parte dos especialistas (inclusive da presença de poços nas mesmas). Variando-se o valor desta relação observa-se quando os lotes selecionados atendem ao uso consultado segundo o conhecimento dos especialistas (esta verificação também pode ser feita a partir de uma amostra de campo).

Após a obtenção de todas as possíveis localizações de poços segundo os critérios considerados, devem ser selecionados os lotes que se encontrem situados nas áreas mais rasas do aquífero, o que é possível através de uma operação de contingência entre estes pontos e a área apresentada na Figura 59. Esta “preferência” pelas áreas mais rasas para efetuar um bombeamento no aquífero justifica-se pelo objetivo a ser alcançado: *rebaixar o aquífero para minimizar os problemas de alagamento*. Sendo este o objetivo desta alternativa de gestão, áreas de cotas de profundidade do aquífero menores devem sofrer intervenções prioritariamente. Além disso, se for obtido um valor satisfatório de rebaixamento para estas áreas, o restante do bairro também será beneficiado.

Estima-se que, com o bombeamento dos poços nas localizações apresentadas nos planos de informação da Figura 71, seja possível a obtenção de um rebaixamento do nível do aquífero. Entretanto considera-se importante que nos locais mais críticos, onde periodicamente o lençol sempre aflora, tenha-se um rebaixamento maior. Para tanto, algumas simulações são realizadas para a obtenção destas áreas aflorantes. Utiliza-se uma simulação de recarga homogênea, somando-se a cada célula do nível do aquífero em maio de 1999 (calculada através das sondagens e do uso do modelo de fluxo subterrâneo), um acréscimo de 100, 200, 300 e 400 mm sucessivamente. Observa-se, através da diferença entre o modelo numérico do terreno (altimetria) e o nível do aquífero acrescido da recarga, as áreas onde o lençol possivelmente afloraria se submetido a tais valores de recarga. As expressões que representam estas operações são apresentadas a seguir e os resultados obtidos são apresentados na Figura 72.

$$[\text{Nível_Maio_99}] + 0,10 \text{ (ou } +0,20, \text{ ou } +0,30, \text{ ou } +0,40) = [\text{Nível Acrescido}]$$

$$[\text{Áreas aflorantes}] = \text{células onde : } [\text{Nível Acrescido}] \geq [\text{MNT}]$$

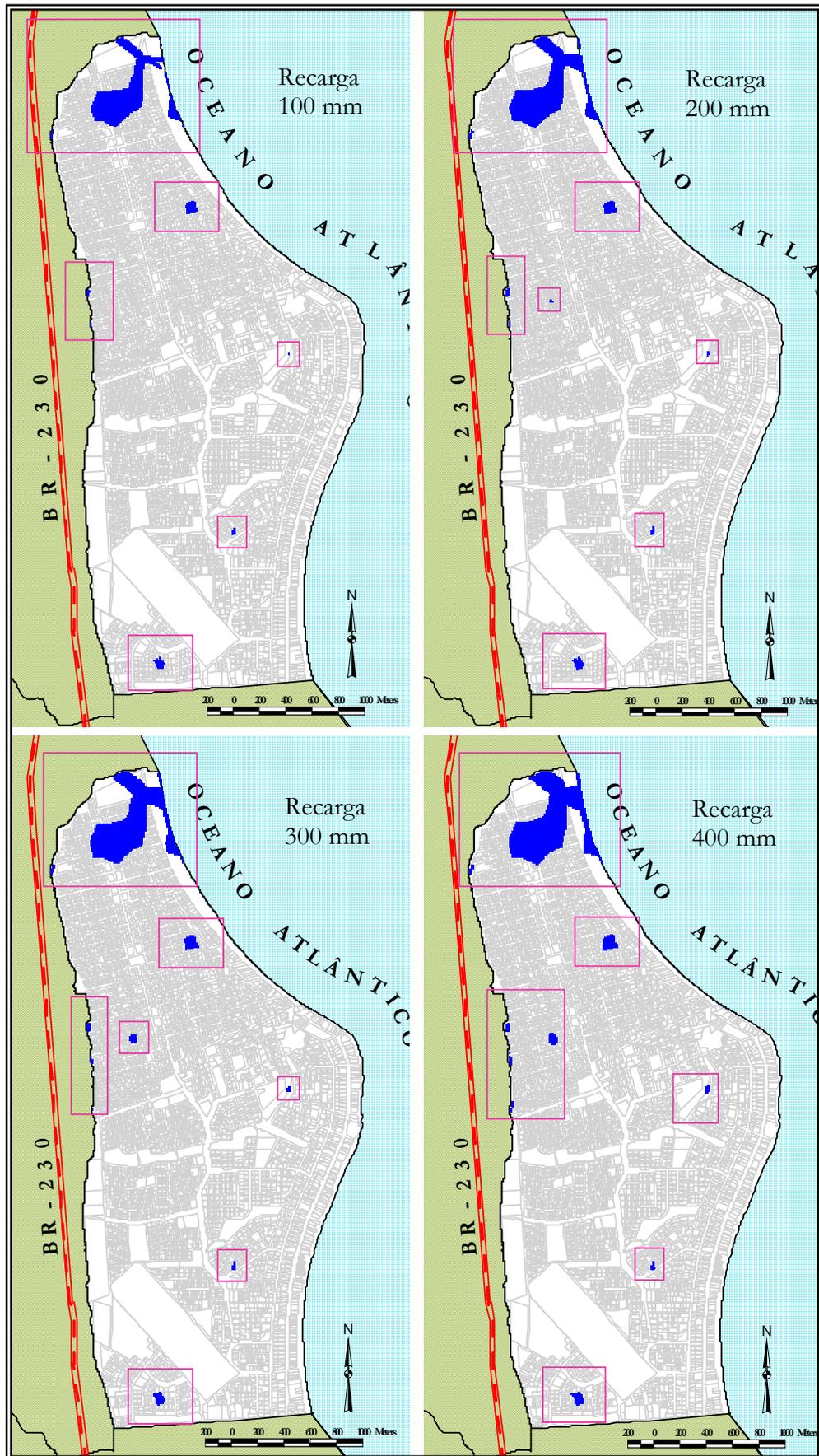


Figura 72 – Simulações de afloramento do lençol para recargas homogêneas de 100, 200, 300 e 400 mm, respectivamente.

De posse de todas estas possíveis localizações algumas análises de sensibilidade já podem ser realizadas para determinar os pontos que realmente serão modelados como poços no modelo de fluxo subterrâneo. Inicialmente nota-se que alguns locais que responderam às consultas referentes às possíveis praças podem ser eliminados da análise: (i) os lotes localizados na área norte do bairro, que caracterizam uma área remanescente de mangue, nunca poderão ser utilizados como praças públicas, portanto podem ser removidos da avaliação. (ii) algum lote selecionado que se encontra muito próximo de um outro lote selecionado também pode ser eliminado, pois certamente não será interessante a implantação de duas praças muito próximas entre si.

Depois de eliminados estes casos, todas as possíveis localizações podem ser exportadas (através de uma tabela com as coordenadas UTM destes pontos) para serem processadas no modelo de fluxo subterrâneo. São utilizadas vazões diferenciadas pelo uso de cada poço (cálculos apresentados na página 102) e a distribuição espacial de todos os poços simulados no bairro pode ser verificada na Figura 73.

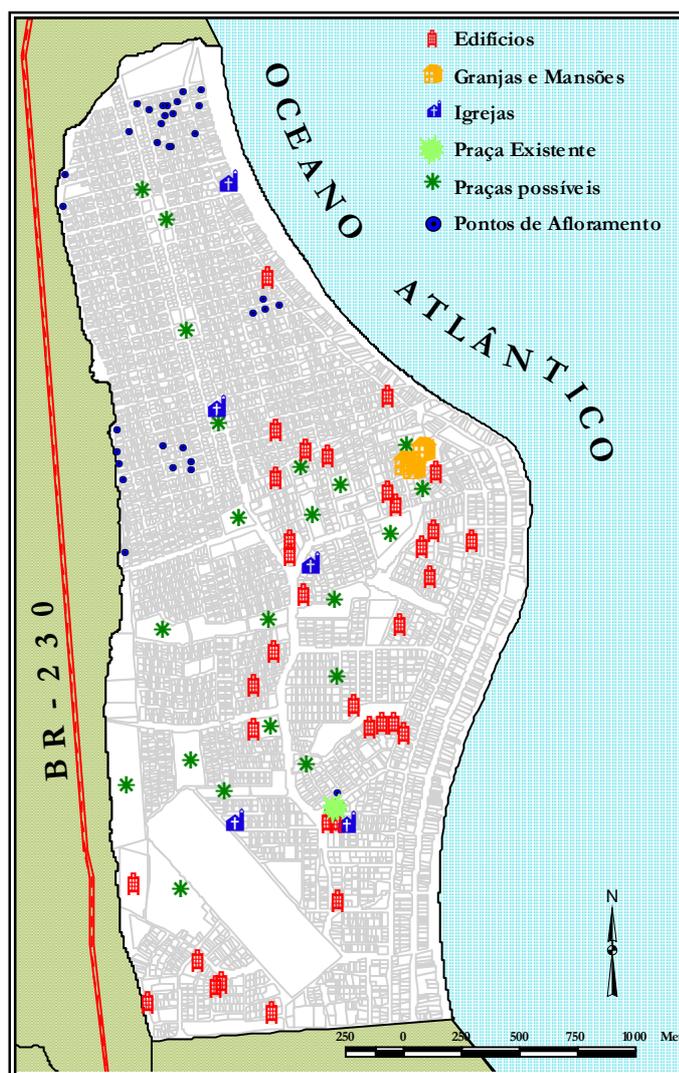


Figura 73 – Localizações sugeridas pela modelagem espacial para ativação/implantação de poços no Bairro do Bessa

Nota-se que alguns locais de afloramento coincidiram com localizações sugeridas baseadas nos critérios anteriores (edifícios com mais de 20 andares, praças, etc.). Por este motivo, não foram incluídos novos poços para simulação nestes locais. A localização dos poços sugerida foi introduzida no modelo de fluxo subterrâneo calibrado para o bairro do Bessa.

Os parâmetros hidrogeológicos utilizados na calibração do modelo de fluxo subterrâneo são apresentados através da Figura 74, na qual observa-se que a condutividade hidráulica (K) variou de $1,0 \times 10^{-5}$ a 8×10^{-5} m/s e a porosidade eficaz (n) de 0,10 a 0,17. O valor de recarga utilizado na calibração foi de 50% da lamina precipitada. Diante do baixo gradiente hidráulico da área, o que dificulta o escoamento superficial e do solo arenoso (favorável a infiltração), característico da região, pode-se afirmar que uma recarga de 50% é um valor aceitável, mesmo se tratando de uma área urbana. As áreas representadas com a mesma cor apresentam o mesmo valor de condutividade (K) e de porosidade efetiva (n).

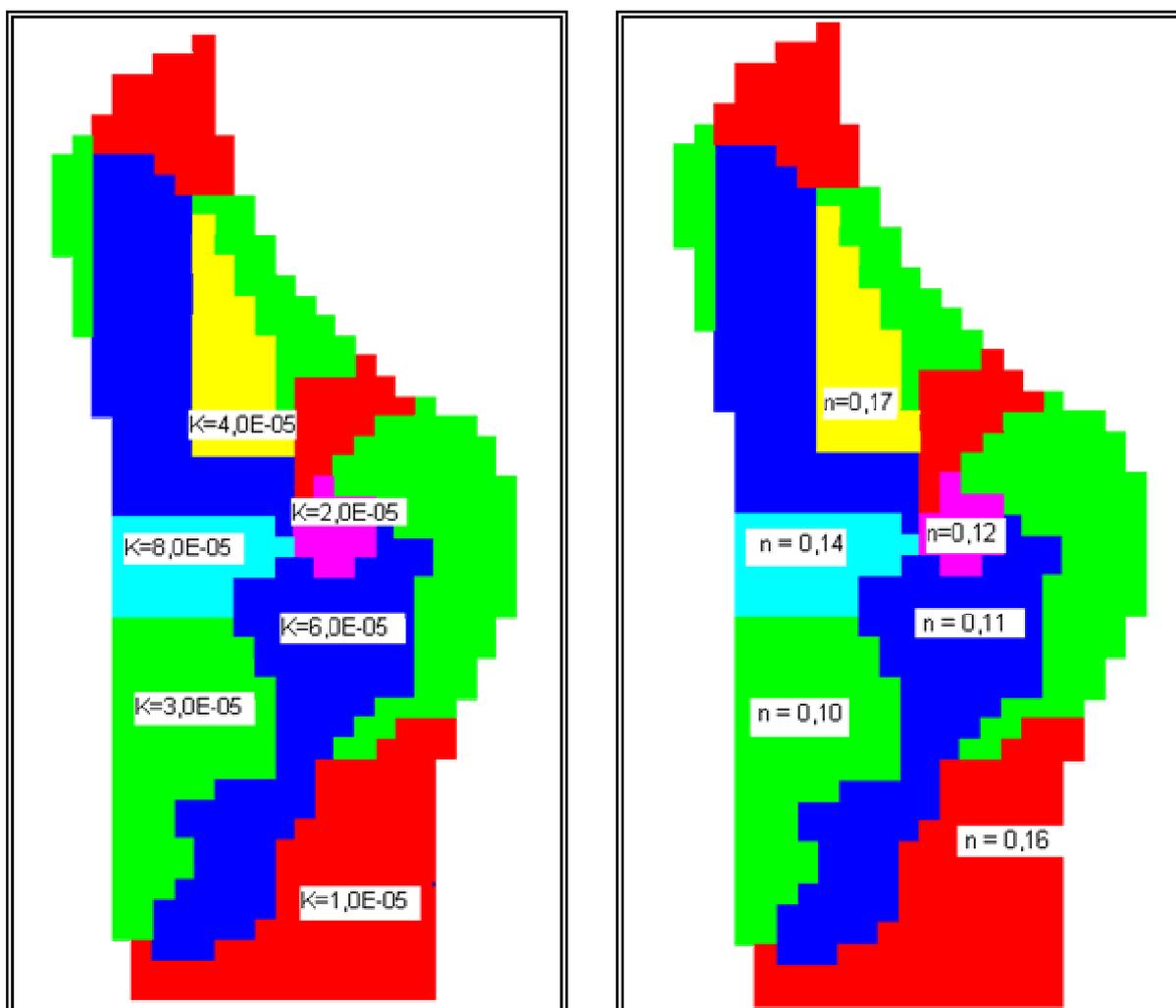


Figura 74 – Distribuição Espacial dos parâmetros hidráulicos (Condutividade Hidráulica e Porozidade efetiva) utilizados na calibração do modelo para a área do Bessa.

Inicialmente o comportamento do aquífero foi simulado com todos os possíveis poços funcionando com uma vazão de $10\text{ m}^3/\text{dia}$. Os rebaixamentos observados foram da ordem de alguns poucos centímetros na maior parte do bairro e apenas nos lotes próximos ao manguezal preservado foi obtido um rebaixamento da ordem de 50 cm (exatamente no local de um dos poços). Isto se deve ao fato de que esta área foi identificada como uma área de afloramento e vários pontos de bombeamento foram sugeridos em lotes vazios e edificios nessa região do bairro. As isolinhas da Figura 75 representam a diferença entre os níveis antes e depois do bombeamento para o período de 15 de junho a 15 de julho de 1999, período no qual foram obtidos os maiores valores de rebaixamento.

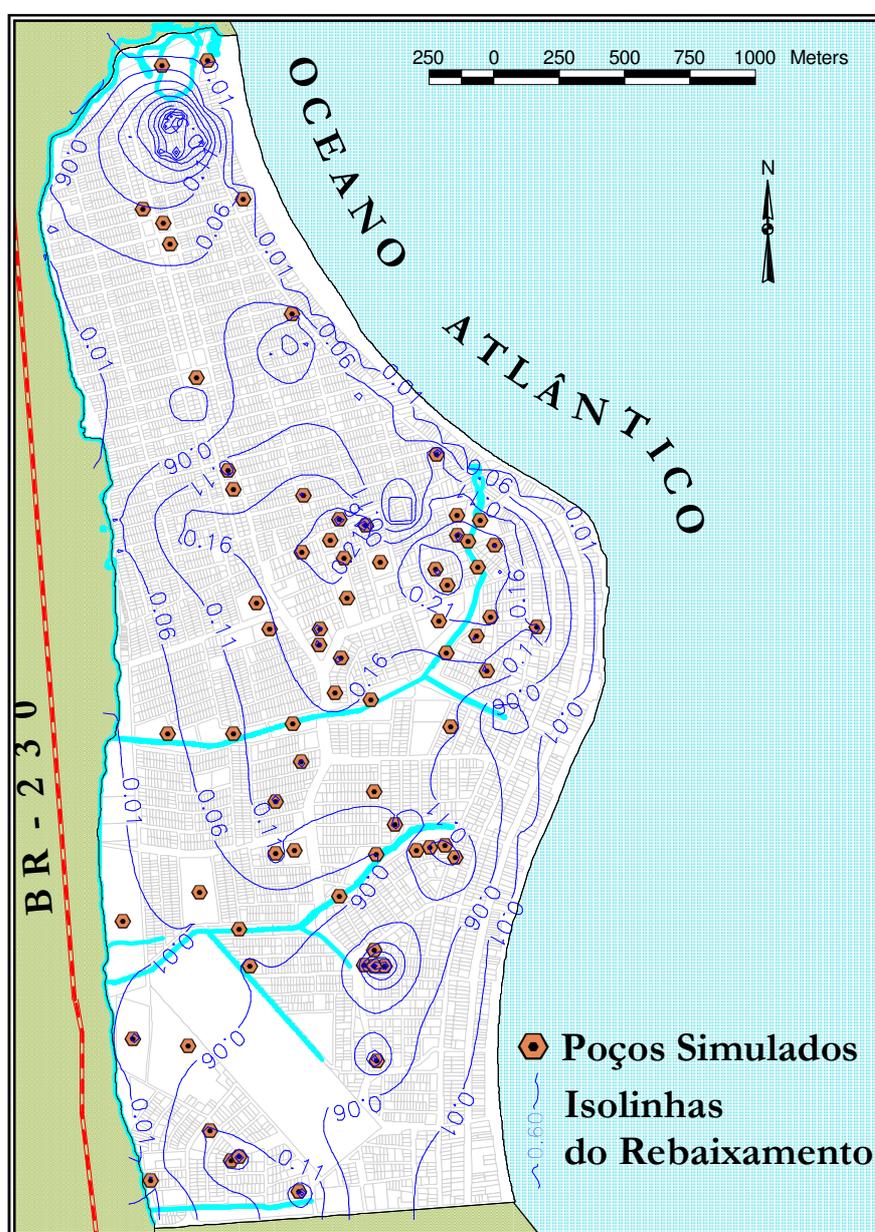


Figura 75 – Rebaixamentos (em metros) obtidos para um bombeamento de $10\text{ m}^3/\text{dia}$ em todos os poços simulados (período de 15 de junho a 15 de julho de 1999).

Dos períodos simulados, o que apresentou níveis piezométricos mais baixos foi o de 15 de março a 15 de abril, período este que historicamente se caracteriza como um período com baixo volume de chuvas. Devido à pequena quantidade diária de água retirada do aquífero, os rebaixamentos obtidos não foram muito significativos e, portanto, não representam um avanço em termos de gestão no bairro (os alagamentos não seriam minimizados apenas com esta intervenção).

Uma outra solução testada através das simulações se caracteriza pelo aumento da vazão para $20\text{m}^3/\text{dia}$ nos pontos de afloramento. Ressalta-se que nestes locais são inseridos pontos de bombeamento nos terrenos vazios e sugeridos usos como “lava-jato”, “lavanderia”, ou “praças”, usos estes que poderiam utilizar-se de uma vazão desta ordem ($20\text{ m}^3/\text{dia}$). Os rebaixamentos obtidos para todo o bairro nesta simulação foram bastante significativos e são apresentados na Figura 76. Novamente os maiores valores de rebaixamento foram encontrados nos poços localizados na proximidade do mangue (aproximadamente $1,07\text{ m}$ para o período de 15 de junho de 1999 a 15 de julho de 1999).

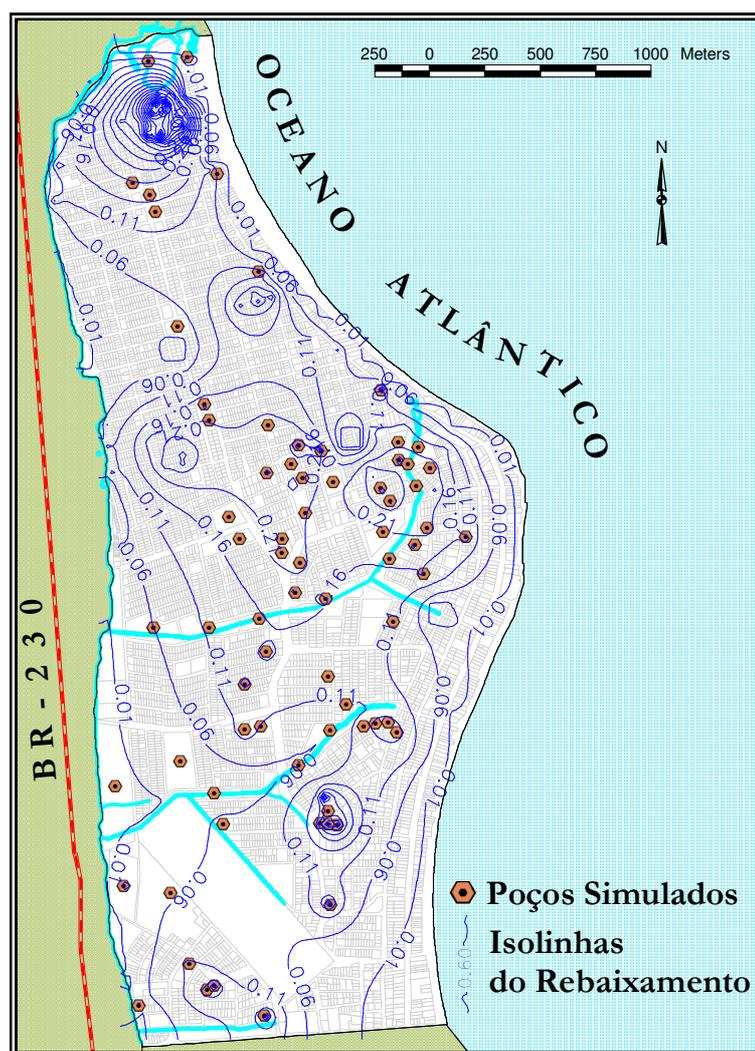


Figura 76 – Rebaixamentos obtidos para um bombeamento de $20\text{ m}^3/\text{dia}$ em pontos de afloramento e de $10\text{ m}^3/\text{dia}$ nas demais localizações.

Observa-se que nesta situação o rebaixamento encontra-se um pouco mais *distribuído* em toda a área do bairro, apresentando valores de rebaixamento entre 10 e 20 cm para algumas áreas e ainda pequenos valores de rebaixamento para as demais áreas. Nesse sentido, uma outra situação que pode ser considerada é que os poços localizados em praças públicas podem servir para o abastecimento de carros-pipa que, atualmente, são utilizados com frequência na irrigação dos canteiros de algumas vias do bairro. Além disso, carros-pipa que são utilizados para irrigação de canteiros de outros locais da cidade poderiam ser abastecidos por estes poços, minimizando custos para a prefeitura. Sendo assim, além dos pontos de afloramento, os poços localizados nas praças (inclusive as sugeridas) também são simulados com vazão de $20\text{m}^3/\text{dia}$ e os demais permanecem com vazão de $10\text{m}^3/\text{dia}$. Esta situação resulta no mapa da Figura 77, onde são verificados os maiores valores de rebaixamento obtidos (1,09 m, nos poços próximos ao mangue, para o período de 15 de junho de 1999 a 15 de julho 1999).

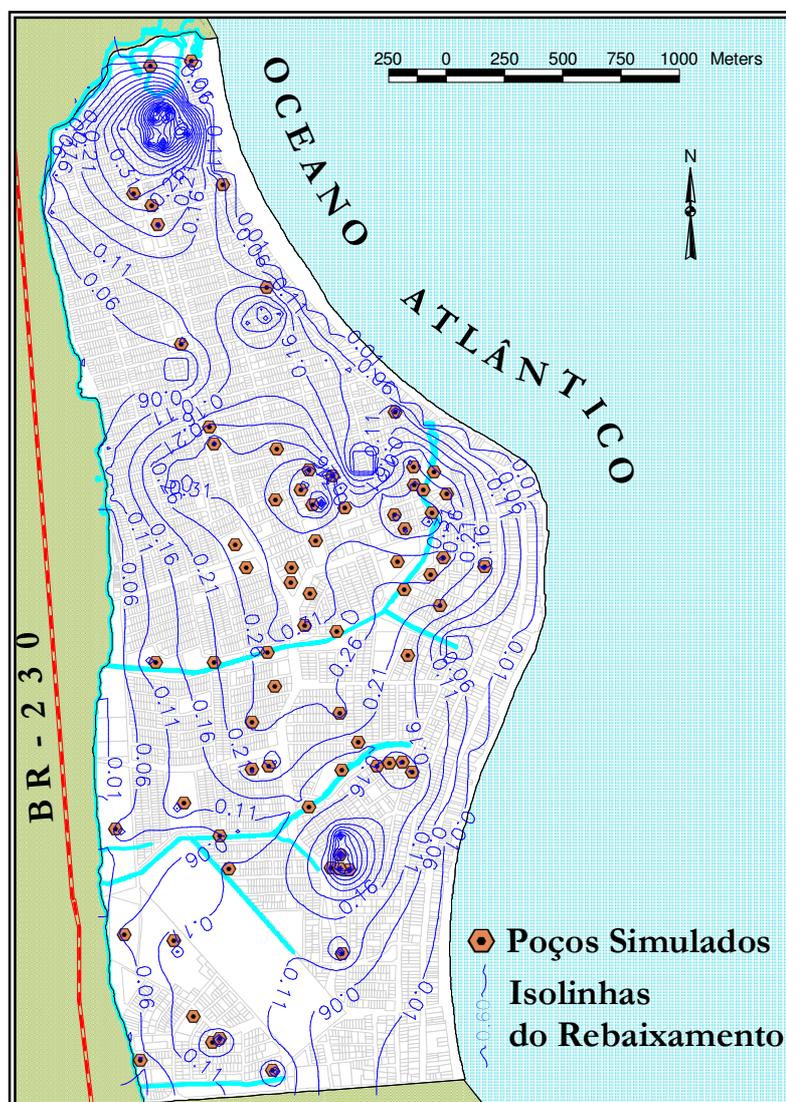


Figura 77 - Rebaixamentos obtidos para um bombeamento de $20\text{m}^3/\text{dia}$ em pontos de afloramento e praças e, de $10\text{m}^3/\text{dia}$ nas demais localizações.

Embora o resultado da simulação tenha sido bastante satisfatório para este último cenário de bombeamento (pontos de afloramento e praças bombeando $20 \text{ m}^3/\text{dia}$ e demais localizações $10 \text{ m}^3/\text{dia}$), a análise deve ser limitada pelo controle da intrusão salina, pois não é recomendável diminuir o problema dos alagamentos ao custo de um desequilíbrio ambiental deste porte. Através do modelo de fluxo subterrâneo, é possível simular a direção do fluxo da água subterrânea em condições de bombeamento. O mapa das linhas de fluxo gerado pelo ModFlow é apresentado na figura 78, bem como um detalhe da área de ocorrência de intrusão salina.

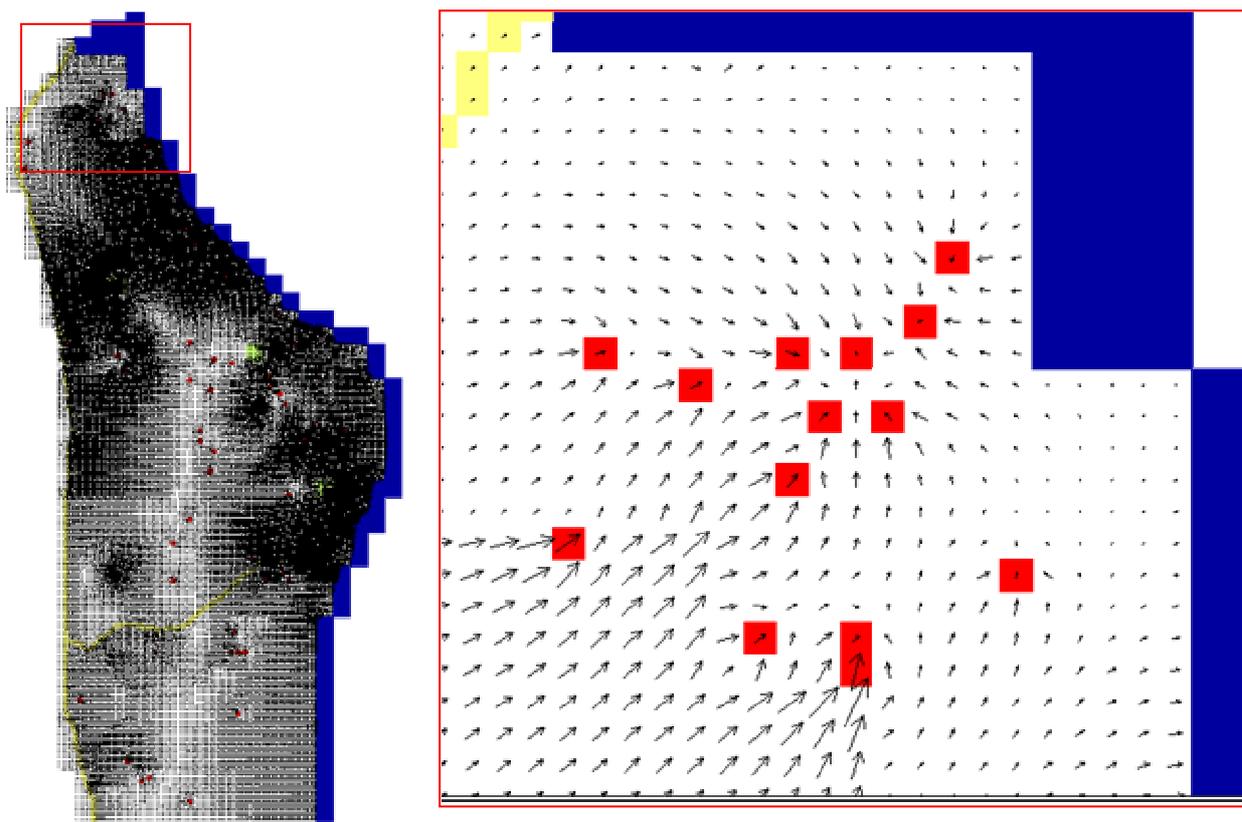


Figura 78 – Intrusão salina verificada após simulação de bombeamento.

Para conter a inversão do fluxo nas proximidades da área do manguezal (área onde foi verificada a intrusão), devem ser retirados alguns dos poços sugeridos e realizadas novas simulações. Os poços retirados são apresentados na Figura 78 juntamente com o mapa de direção de fluxo, gerado a partir de novas simulações. Observa-se nesta figura que não se verifica a ocorrência de avanço da cunha salina para esta situação, o que pode ser caracterizado como uma situação de equilíbrio.

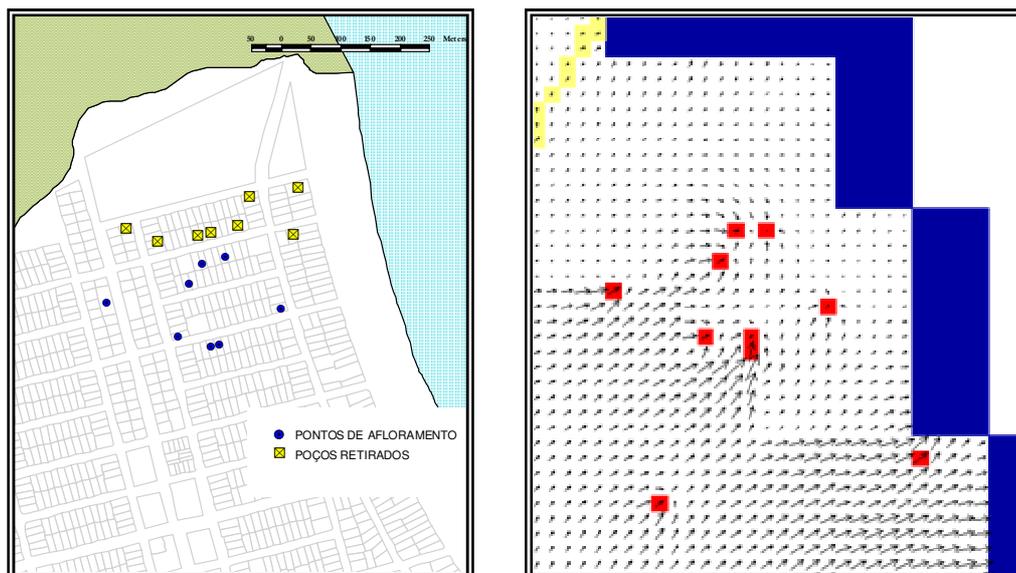


Figura 79 – Localizações de poços sugeridas que foram retirados da análise e mapa de direção de fluxo obtido após nova simulação.

Controlada a intrusão salina, observam-se então os rebaixamentos obtidos após a retirada de alguns dos poços utilizados nas simulações anteriores. Este resultado é considerado neste trabalho como um limite para exploração do aquífero, visto que é um cenário que pode ser entendido como uma situação limite de equilíbrio e que, em períodos de alto índice pluviométrico, pode minimizar os alagamentos freqüentes em vários pontos do bairro (Figura 80).

A partir das isolinhas potenciais do nível do aquífero geradas pelo ModFlow pode ser elaborado um novo plano de informação referente ao nível piezométrico sob as condições de bombeamento determinadas na simulação. Em todas as simulações o período em que os níveis piezométricos se apresentaram mais altos, mesmo após sofrer rebaixamento, foi o de 15 de junho de 1999 a 15 de julho de 1999. Sendo assim a não ocorrência de afloramentos do lençol neste período em que os níveis estão mais altos implica na não ocorrência nos demais períodos de níveis mais baixos.

Utilizando o mesmo procedimento apresentado na Figura 72, podem ser simuladas no SIG recargas homogêneas no aquífero para este período e verificados possíveis pontos de afloramento após rebaixamento. Verifica-se após simulações que o aquífero *não aflora* mesmo quando se supõe uma recarga de 400 mm em toda a área do bairro.

Cabe ressaltar que parte da água que precipita evapora e apenas uma parte infiltra no solo por percolação e configura uma recarga. Por este motivo, mesmo apresentando uma precipitação acumulada de mais de 500 mm em alguns meses, como foi o caso de junho de 2004, segundo os resultados obtidos, as intervenções propostas, o bombeamento de poços em algumas localizações para atender aos usos justificados, seria um grande avanço na gestão urbana no bairro do Bessa,

minimizando os desconfortos sociais e econômicos causados pelos alagamentos e mantendo o equilíbrio ambiental. Para que estas intervenções sejam viabilizadas deve haver uma conscientização da população no sentido de estimular o uso da água subterrânea para os usos especificados. Entretanto, sabe-se que, um trabalho de conscientização da população, na maioria dos casos, não é suficiente para garantir o cumprimento das ações necessárias à gestão. Torna-se imprescindível portanto, uma regulamentação específica que seja o instrumento legal da gestão dos recursos hídricos no ambiente costeiro.



Figura 80 – Níveis piezométricos limite após rebaixamento (15/06/99 a 15/07/99).

5.3. Alternativa "C": Bom Funcionamento dos Canais

Os estudos realizados pela ATECEL/UFPB (1999) acerca da influência da drenagem superficial nos recursos hídricos subterrâneos no bairro do Bessa concluíram que os atuais canais projetados poderiam desempenhar a função de drenos subterrâneos, mesmo que as juntas de dilatação dos mesmos, não tenham sido dimensionadas para este fim. Para tanto, é imprescindível a manutenção regular dos canais evitando a obstrução por cimentação, colmatação ou crescimento de vegetação. A obstrução do canal por entulhos, formando verdadeiros barramentos internos, eleva imediatamente o nível d'água no seu interior, podendo, em alguns trechos, inverter o fluxo, passando o canal a alimentar o aquífero.

Dessa forma, pode-se simular os canais funcionando como drenos subterrâneos utilizando uma função específica do ModFlow e avaliando o comportamento do aquífero sob condições de bombeamento apenas nas proximidades dos canais. Esta alternativa pode auxiliar a rebaixar o nível do lençol nas áreas circundantes aos canais de forma a não permitir a elevação do nível d'água no seu interior por alimentação subterrânea (o nível pode ser elevado pelo aumento das águas pluviais, por exemplo). A Figura 81 apresenta as localizações de poços selecionadas a partir de uma análise de proximidade aos canais (em um raio de 200 metros) e os rebaixamentos obtidos considerando um bombeamento de 10 e 20m³/dia conforme os usos especificados na alternativa anterior.

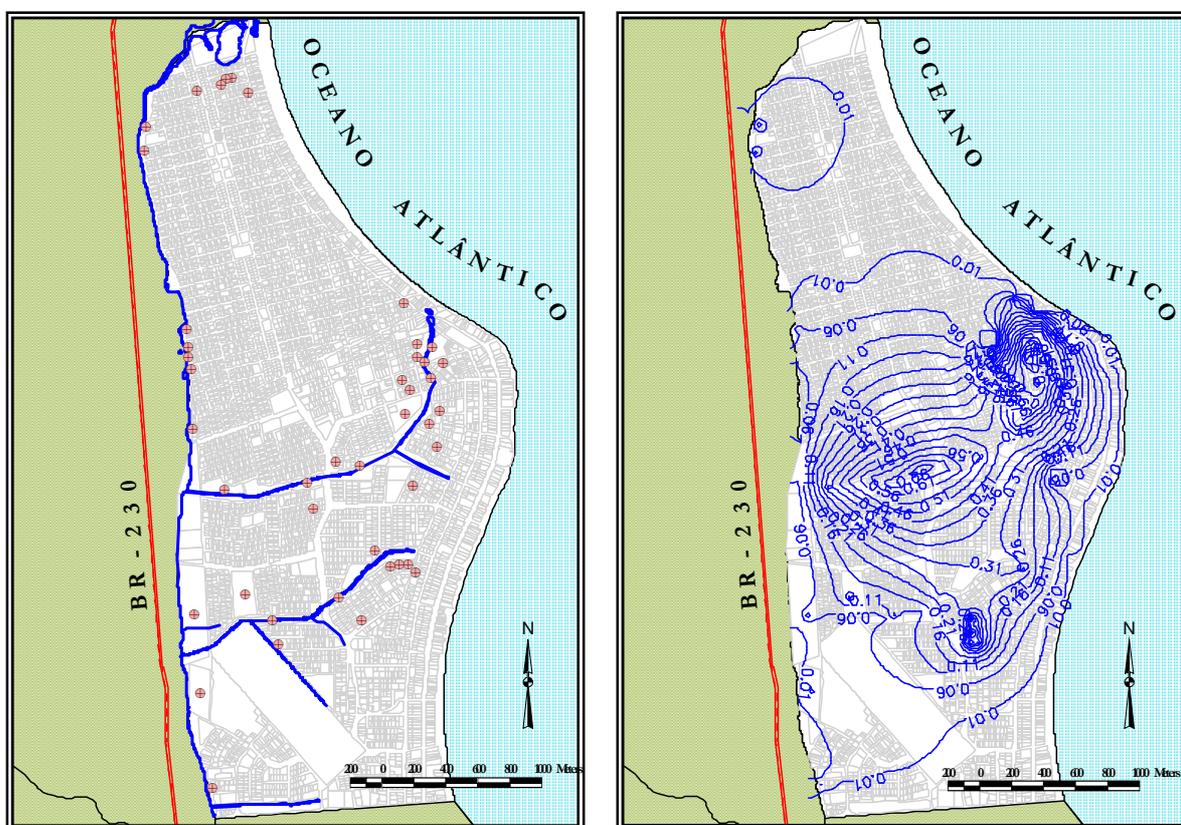


Figura 81 – Alternativa C: bombeamento nas proximidades dos canais.

Assim como na alternativa anterior, o avanço da cunha salina nestas condições deve ser verificado, de forma que, se necessário, alguns poços sejam retirados da análise (Figura 82).

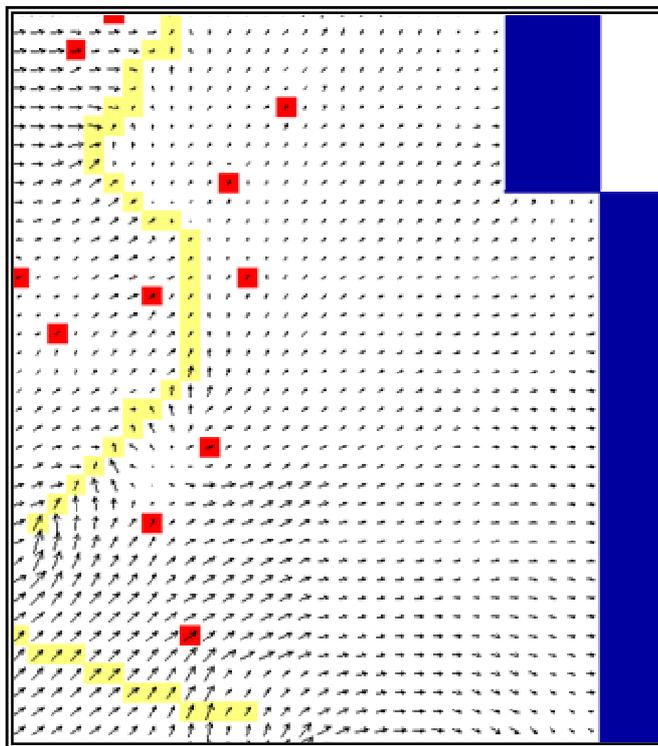


Figura 82 – Verificação da intrusão salina no cenário de bombeamento próximo aos canais.

Conforme se verifica através das simulações, não ocorre intrusão salina para nenhum dos períodos simulados. O maior rebaixamento obtido foi da ordem de 1,45 m nas proximidades do maceió do Clube dos Médicos (Figura 83), local este em que, um dos canais lança suas águas e onde freqüentemente ocorrem alagamentos devido ao aterramento efetuado, para permitir a ocupação dos terrenos localizados em suas várzeas e à elevação do greide da Av. Argemiro de Figueiredo (via que atravessa o maceió) quando da sua pavimentação.



Figura 83 – Maceió do Clube dos Médicos (Nóbrega, 2002).

5.4. Alternativa “D”: Garantir áreas mínimas de recarga

Submetido às condições de bombeamento especificadas na alternativa “B”, o aquífero se apresenta com os níveis piezométricos mais baixos, como pode ser observado na Figura 80. Embora para a situação atual o rebaixamento se apresente como uma solução viável, à medida que o bairro é urbanizado as áreas de recarga diminuem, o que pode causar uma situação de desequilíbrio ambiental (avanço da cunha salina, superexploração do aquífero, etc.). Nesse sentido, faz-se necessária a determinação de melhores áreas para viabilizar uma recarga que seja suficiente para manter o equilíbrio do aquífero. A partir dos níveis piezométricos rebaixados obtém-se um novo mapa de profundidade apresentado na Figura 84.

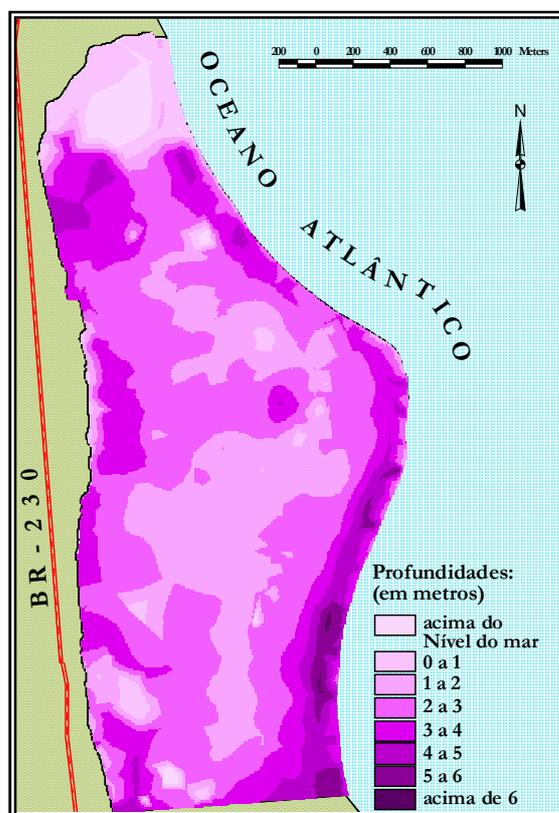


Figura 84 – Mapa de profundidade do aquífero após rebaixamento

Na modelagem espacial é sugerida uma análise multicriterial, cujo plano de informação resultante deve expressar, através de valores variáveis entre 0 e 100, as melhores áreas do bairro para recarga. São considerados nesta análise 3 (três) critérios de adequação e 1 (um) critério restritivo. São estes: a *Declividade*, a *Profundidade do aquífero após simulação* e a *Precipitação* e, a restrição *Permeabilidade*, que foi anteriormente apresentada na Figura 50. Para os critérios de adequação, conjuntos difusos são utilizados para atribuir a cada plano de informação um grau de pertinência (também chamado de grau de adequação) variando de 0 a 100 (para cada célula), indicando um aumento contínuo de uma situação de não pertinência para uma de total pertinência à condição estabelecida.

De outro modo, o critério restritivo *Permeabilidade* se caracteriza como uma imagem binária, na qual, os valores 1 indicam as células onde há permeabilidade do solo e 0 as células onde não há permeabilidade do solo. Esta informação da permeabilidade considera as condições de pavimentação das ruas além das áreas edificadas internas de cada lote. A imprecisão e incerteza agregada a este plano de informação está no fato de que não estão sendo consideradas as calçadas ou áreas internas aos lotes que possivelmente tenham sido impermeabilizadas (o uso de pedra “rachão” ou cimento em jardins é um hábito bastante comum entre a população local).

As funções de adequação encontradas para os critérios considerados são apresentadas nas Figuras 85, 86 e 87, ressaltando apenas que para o critério *Precipitação*, por se tratar de uma área muito pequena, (apenas um bairro), pode-se considerar que a quantidade de chuva que precipita é a mesma em todo o bairro. Áreas com declividades menores acumulam mais água e portanto facilitam a infiltração. Da mesma forma, áreas onde o aquífero é mais raso serão potencialmente melhores para a recarga.

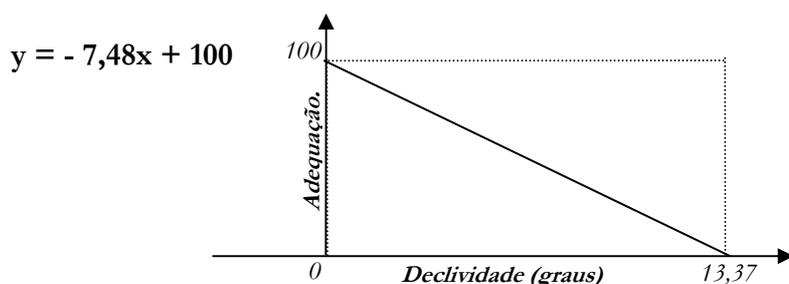


Figura 85 – Função linear monotonicamente decrescente para o critério “declividades”.

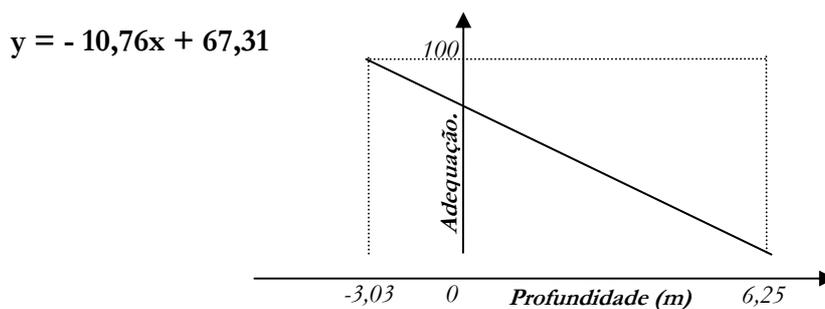


Figura 86 – Função linear monotonicamente decrescente para o critério “profundidade”.

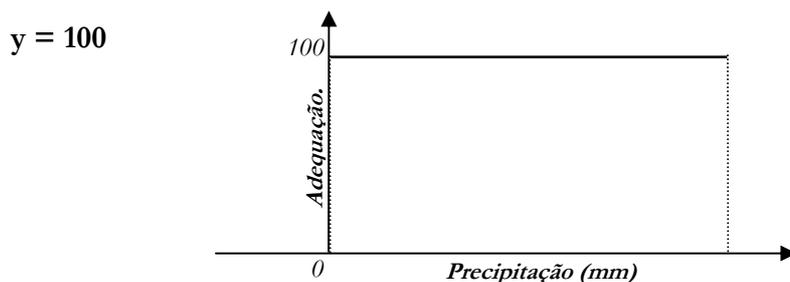


Figura 87 – Função constante para o critério “precipitação”.

A Figura 88 apresenta a configuração espacial destes critérios padronizados para uma escala comum através das funções de adequação determinadas.

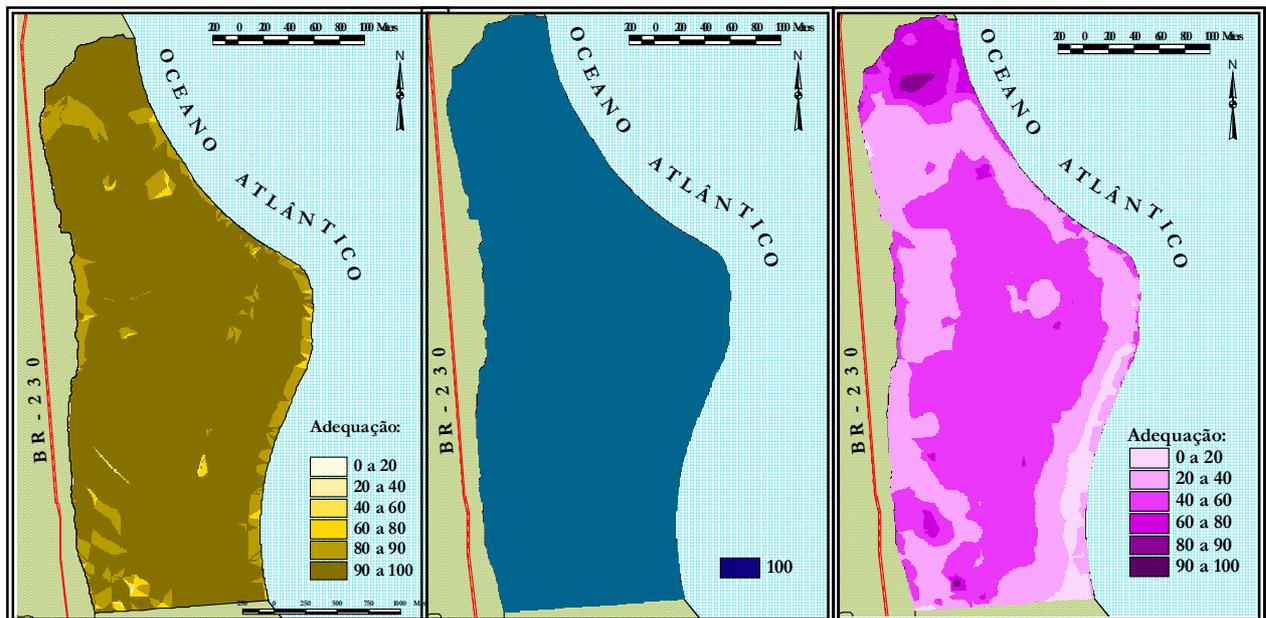


Figura 88 – Critérios de Adequação padronizados.

Considerando a permeabilidade como critério restritivo, é realizada mais uma análise multicriterial espacial utilizando-se o método de Combinação Linear Ponderada segundo os pesos e preferências apresentados na expressão abaixo. Assim como nas combinações anteriores, os critérios recebem uma importância *relativa* através dos pesos de compensação. Neste caso, a profundidade do aquífero e a precipitação têm *relativamente* o mesmo peso na indicação das áreas *mais adequadas* para recarga.

$$\left[0,40 \left[\text{Profundidade} \right] + 0,2 \left[\text{Declividade} \right] + 0,4 \left[\text{Precipitação} \right] \right] \times \left[\text{Permeabilidade} \right]$$

O mapa resultante se caracteriza como uma matriz de células que variam entre valores que representam o intervalo da *menor* pertinência à *maior* pertinência ao conjunto estabelecido. Para determinar as “melhores” áreas os maiores valores devem ser selecionados (Figura 89).

Uma das maneiras de garantir que algumas destas áreas não venham a ser impermeabilizadas pode ser a avaliação das áreas obtidas, para determinar os lotes nos quais a implantação de praças é viável sob alguns aspectos considerados a saber: a *proximidade à residências* (praças são equipamentos públicos que devem servir áreas residenciais), a *proximidade a outras praças existentes* (novas praças não devem ser construídas muito próximo a praças existentes), a *área dos lotes* (os lotes maiores são mais indicados para áreas verdes como praças).

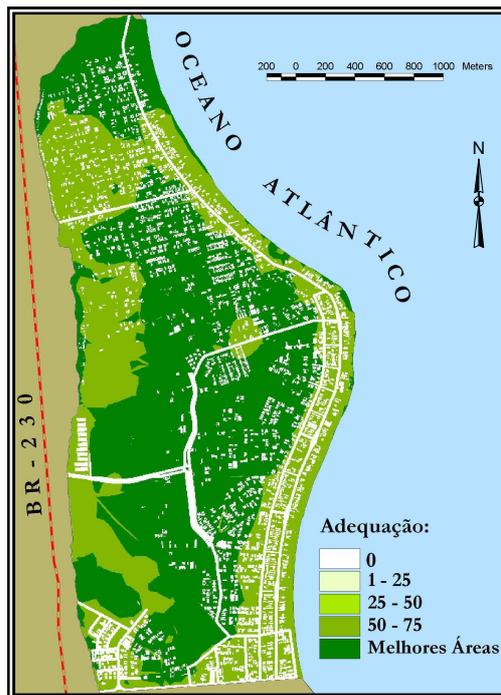


Figura 89 – Melhores áreas para recarga.

Nesse sentido, estes critérios devem ser gerados a partir dos dados existentes. Através do mapa de uso do solo é possível obter a localização dos lotes residenciais e, por conseguinte, através de operador de distância, obter o mapa de *distâncias às residências* (Figura 90). De maneira análoga pode ser obtido o mapa de *distância às praças*. Ressalta-se que, na área de estudo, existe apenas um lote cadastrado oficialmente como praça, o que pode ser observado na Figura 90. Apenas a área dos lotes vazios deve ser considerada, partindo do princípio que um lote ocupado não deverá ser transformado em uma praça. Desta forma, as áreas dos lotes vazios devem ser calculadas e associadas ao mapa para que se configure em um valor atribuído para cada célula. A Figura 90 apresenta os critérios considerados.

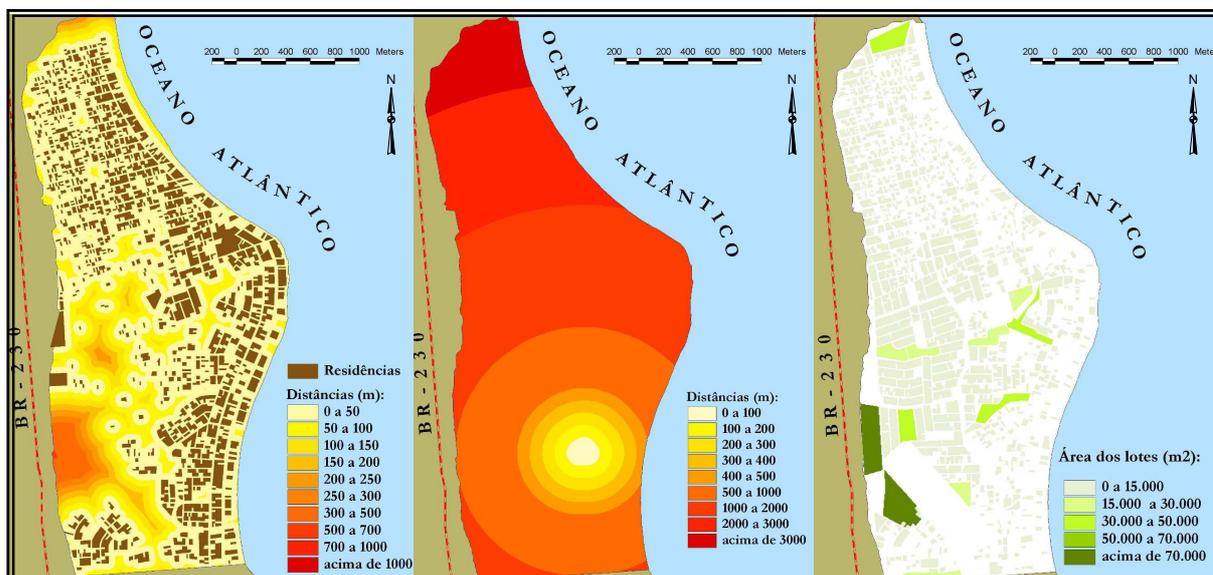


Figura 90 – Distâncias às residências, distâncias às praças e áreas dos lotes vazios.

As funções de adequação a que estes critérios devem ser submetidos são apresentadas nas Figuras 91, 92 e 93.

$$y = -0,066x + 100$$

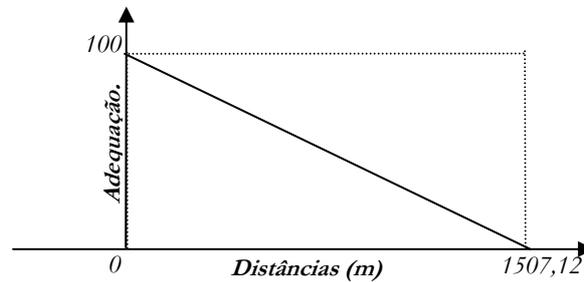


Figura 91 – Função linear monotonicamente decrescente para o critério “distâncias às residências”.

$$y = 0,026x$$

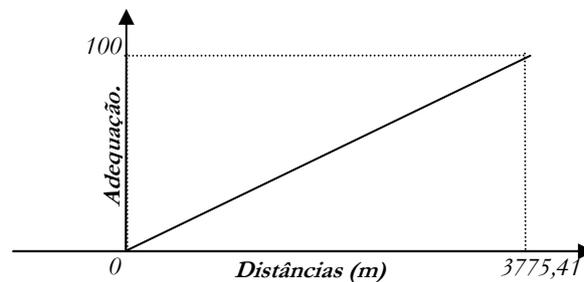


Figura 92 – Função linear monotonicamente crescente para o critério “distâncias às praças”.

$$y = 1,21 \times 10^{-3}x$$

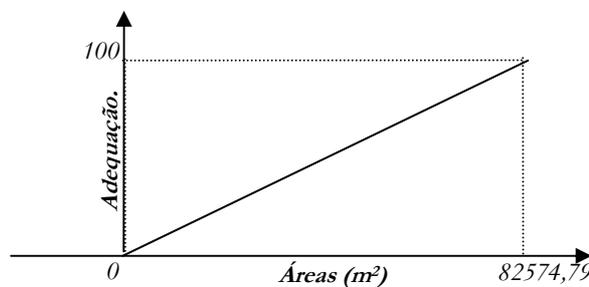


Figura 93 – Função linear monotonicamente crescente para o critério “áreas dos lotes vazios”

O resultado da análise multicritério representado na Figura 89 deve ser considerado um critério restritivo na análise atual, ou seja, uma imagem binária onde células com valores iguais a “1” correspondem às áreas para as quais foram encontradas as melhores condições de recarga e, as demais, (com valores iguais a “0”), correspondem às áreas nas quais a análise não deve ser feita. Deste modo a representação algébrica desta análise pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\left[0,30 \left(\begin{array}{c} \text{Distância a} \\ \text{residências} \end{array} \right) + 0,2 \left(\begin{array}{c} \text{Distância a} \\ \text{praças} \end{array} \right) + 0,5 \left(\begin{array}{c} \text{Áreas dos} \\ \text{Lotes vazios} \end{array} \right) \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{Melhores áreas} \\ \text{para recarga} \end{array} \right]$$

Neste caso, é atribuído ao tamanho dos lotes um maior peso com relação aos demais critérios. O critério “distâncias às praças”, apesar de se configurar genericamente como um critério importante, não é representativo no caso em estudo. Isto se deve ao fato de apenas uma praça ter sido encontrada no cadastro e, portanto, a maior parte do bairro encontrar-se atendendo positivamente à análise. A Figura 94 apresenta as áreas verdes recomendadas segundo esta avaliação.



Figura 94 – Lotes recomendados para a implantação de praças (áreas verdes) no bairro.

O resultado obtido pode ser considerado válido, observando que algumas das áreas recomendadas são lotes que abrigam as margens dos canais de drenagem e, portanto, já têm a preservação de parte da área do lote prevista em lei (faixas marginais que dependem da largura do corpo hídrico). Sendo assim, o aproveitamento destas áreas como um equipamento urbano de lazer (praça) auxiliaria no cumprimento da legislação ao passo que garantiria áreas de recarga do aquífero.

5.5. Escolha entre Alternativas: Possibilidades

Diante dos resultados obtidos pode-se afirmar que a implementação de todas as alternativas, segundo a ordem proposta (A, B, C, D) seria um grande avanço na gestão dos recursos hídricos e, em última instância, na gestão urbana do bairro. A escolha entre as alternativas, ou até mesmo uma alteração na ordem de intervenção pode ser estabelecida a partir de fatores como disponibilidade de recursos, interesses políticos, situações emergenciais, etc. Os mapas finais resultantes da modelagem espacial em cada uma das alternativas podem ser combinados e analisados segundo alguns critérios estabelecidos, utilizando os mesmos recursos do SIG discutidos e apresentados anteriormente (inferências espaciais, operadores fuzzy, análise multicriterial espacial, lógica booleana, etc.).

Desse modo, pode-se dizer que a continuidade deste trabalho aponta para estas possibilidades de combinação, sendo necessário para tanto, o estabelecimento de prioridades e, portanto, a agregação de preferências aos “mapas critérios”, de forma a permitir uma escolha coerente entre as alternativas. Esta escolha dependerá dos fatores ligados à gestão (recursos financeiros, recursos técnicos, interesses políticos, etc.) e do método comparativo a ser utilizado (por exemplo: se a importância relativa das alternativas será atribuída aos pares, se serão comparadas e atribuído-lhes os pesos ao mesmo tempo, etc.).

Capítulo 6

Conclusões

*"O pensamento é a ação ensaiando."
(Sigmund Freud)*

Os conceitos, as técnicas e os resultados apresentados e discutidos nesta tese demonstram que nos dias atuais, faz-se necessário a utilização de novas práticas de trabalho para promover uma gestão eficiente de águas. Nestas novas práticas, profissionais de diversas especialidades trabalham em equipe, o que faz com que a questão da *multidisciplinaridade* seja frequentemente considerada. Nesse contexto, é possível perceber, principalmente através dos resultados apresentados, que a troca, junção ou sobreposição de informações advindas de diferentes fontes de conhecimento podem assegurar uma tomada de decisão de melhor qualidade em problemas de gestão.

As novas práticas de trabalho que envolvem a gestão de águas em um contexto multidisciplinar perpassam inevitavelmente pelo trabalho *colaborativo*. A *colaboração* extrapola os conceitos de *comunicação*, de *participação coletiva* e de *troca de idéias e informações*. Enquanto a comunicação implica a troca de informações, a colaboração significa a criação de uma compreensão, um entendimento compartilhado dos objetivos a serem alcançados e, principalmente, dos requisitos a serem cumpridos.

Nesse sentido, a utilização de um SIG como um Sistema de Apoio a Decisão Espacial, o caracteriza como uma ferramenta de *integração* de conhecimentos. Mais que isso, a possibilidade de modelar e representar espacialmente conhecimentos obtidos junto a uma equipe multidisciplinar de gestão, pode melhorar a qualidade das decisões tomadas, facilitar a colaboração entre os diversos agentes envolvidos e, em última instância, ajudar a minimizar alguns problemas causados pela gestão inadequada dos recursos naturais.

Em ambientes costeiros, como é o caso específico tratado neste trabalho, a gestão integrada dos recursos hídricos pode ser viabilizada pela metodologia proposta, haja visto os resultados encontrados quando da experimentação de área estudada e seus problemas reais. Deste modo, algumas contribuições da pesquisa identificadas, bem como as conclusões obtidas, são apresentadas a seguir.

6.1. Representação de Conhecimento em SIG

*“Os investimentos em conhecimento geram os melhores dividendos.”
(Benjamin Franklin)*

As diversas observações, experimentações, análises e discussões realizadas, demonstraram que é possível modelar e representar processos decisórios relativos à gestão de recursos hídricos, fazendo uso de um Sistema de Informação Geográfica. Entretanto, alguns aspectos relevantes, inerentes ao processo de modelagem e ao ambiente SIG e sua capacidade de suporte à decisão, foram observados e, assim, considerados conclusões desta pesquisa.

* Aquisição do Conhecimento Especializado: Subjetividade

A maneira como o conhecimento foi adquirido junto à equipe de gestão neste trabalho traz consigo uma carga muito grande de subjetividade e prescinde de experiências anteriores *na área* em questão e não apenas *nos problemas* abordados. Métodos mais estruturados de aquisição do conhecimento (questionários padrões, técnicas indutivas, etc.) poderiam tornar a mesma aplicação mais genérica, de forma que os especialistas não necessitariam necessariamente conhecer a área onde seria realizada a gestão e sim, o *tipo de problema* a ser solucionado nesta área.

* Ganho de Conhecimento com o SIG: Interações Valiosas

O ganho de conhecimento em todo o processo de modelagem é tanto maior, quanto mais interações ocorrerem entre a equipe de gestão e a ferramenta computacional. As perspectivas apontadas pelos primeiros resultados obtidos, bem como as possibilidades de exploração dos recursos disponíveis, geram inevitavelmente mais conhecimento em todas as fases da modelagem. É muito difícil identificar, ao término da implementação, quais dos planos de informação representam *apenas* o conhecimento modelado dos especialistas e quais são fruto das diversas interações que ocorreram entre os especialistas e o ambiente computacional de decisão gerado.

* Incerteza: Presente em toda a Modelagem

Na apresentação e análise dos resultados a questão da incerteza foi quase sempre associada à ausência de informações. Este fato, comum aos problemas de gestão em recursos hídricos, foi tratado neste trabalho de forma generalizada e em nenhum momento esta incerteza foi quantificada para de alguma forma ser atribuído a cada resultado um certo *grau* de incerteza. Além disso, em problemas especializados, alia-se à ausência de informação, as questões inerentes à imprecisão dos levantamentos como a qualidade dos dados existentes, escala utilizada, etc. Métodos de

quantificação e identificação de incerteza poderiam ser utilizados no contexto da metodologia proposta por este trabalho, inclusive lançando mão de recursos de lógica difusa e operadores estatísticos do próprio SIG utilizado.

Ressalta-se que mesmo diante de incertezas diversas e até mesmo ausência de informações, as decisões precisam ser tomadas para a solução dos problemas e foi *esta tomada de decisão em meio à ausência e imprecisão de algumas informações* que foi reproduzida pelo SIG através do conhecimento especializado modelado e representado em planos de informações.

*** Grande Volume de Informações: Gerenciamento Eficiente**

Fica claro, através do estudo de caso implementado, que promover a gestão de recursos hídricos em ambientes costeiros, considerando os diversos aspectos inerentes a estes ambientes (hidrológicos, hidrogeológicos, ambientais, legais, urbanísticos, sociais, econômicos, etc), envolve a manipulação de um volume muito grande de informações. A diversidade de conhecimentos envolvidos exige um gerenciamento eficiente dos dados em todas as etapas de trabalho. A continuidade de uma aplicação como esta em um setor de planejamento de um órgão público, por exemplo, depende diretamente deste gerenciamento das informações.

A espacialização do conhecimento em planos, ao passo que abre possibilidades de análise, requer simultaneamente uma preocupação com o armazenamento e organização dos mesmos. Portanto, pode-se afirmar que a aplicabilidade de um SIG como um Sistema de Apoio à Decisão Espacial depende muito mais do gerenciamento eficiente do conhecimento modelado e representado do que propriamente dos recursos disponibilizados por este tipo de ferramenta.

*** Espacialização do Conhecimento: Visualização do “Problema” e das “Soluções”**

É possível perceber, através deste trabalho, que a espacialidade das informações é fundamental para a recomendação de soluções para problemas de gestão. Visualizar o conhecimento em planos de informação espaciais facilita a compreensão de alguns aspectos dos problemas a serem solucionados. A visualização das soluções (resultados) também é importante, pois, em se tratando de problemas relacionados com a gestão de uma porção do território (seja ele urbano ou regional), uma visualização de resultados pode ser entendida como uma simulação das intervenções a serem realizadas e, portanto, podem aumentar a confiabilidade destes resultados, dando suporte de forma muito mais segura a uma tomada de decisão.

6.2. Água e Planejamento Urbano

“Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível e, de repente, você estará fazendo o impossível.”
(Francisco de Assis)

Uma das contribuições desta pesquisa está na integração entre os aspectos de planejamento urbano e a gestão dos recursos hídricos. O planejamento urbano é entendido neste trabalho como uma ciência de caráter multidisciplinar de projetar – de maneira racional e organizada- a distribuição e adequação do espaço físico, com o objetivo de proporcionar e manter condições dignas de vida a todas as pessoas envolvidas. Nesse sentido, este planejamento tem que considerar variáveis hidrológicas, para evitar problemas como os que foram identificados através do estudo de caso desenvolvido.

A ocupação urbana desordenada (mal planejada) provoca mudanças nas características físicas das bacias hidrográficas e conseqüentemente de todo o ciclo hidrológico de uma região. A relação ambiente natural e ambiente construído é interativa e quando qualquer uma das partes sofre impactos, seja de ordem ambiental, estrutural ou sócio-econômica, os efeitos ocorrerão também sobre os demais segmentos urbanos.

Nesse sentido, a metodologia apresentada demonstra que a partir de medidas ou ações não estruturais, grandes problemas de gerenciamento de recursos hídricos podem ser solucionados. As medidas ou ações estruturais são aquelas que requerem a construção de estruturas, para que se obtenham controles no escoamento e na qualidade das águas, como a construção de barragens e adutoras, a construção de estações de tratamento de água etc. As medidas ou ações não estruturais são programas ou atividades que não requerem a construção de estruturas, como zoneamento de ocupação de solos, regulamentação contra desperdício, etc.

Deste modo, as simulações realizadas apresentaram um resultado satisfatório que poderia minimizar os impactos sociais e econômicos, causados pelos alagamentos freqüentes no bairro do Bessa, através do disciplinamento do uso da água subterrânea sob algumas condições pré-estabelecidas. As medidas propostas, consideradas “não-estruturais”, apontam uma tendência na busca por soluções de gestão em ambientes urbanos. Em áreas com alta densidade de ocupação, por exemplo, a intervenção por meio de grandes obras de infra-estrutura, ao passo que solucionam problemas, podem causar desconfortos à população em diversos aspectos como desapropriações, alterações no trânsito, etc.

Portanto, este trabalho evidencia a necessidade de uma interação maior entre os profissionais de planejamento urbano e de recursos hídricos. Soluções como as propostas neste documento tese só são possíveis, a partir de uma visão holística (recomendada na Agenda 21) que considere os diversos aspectos envolvidos em problemas aparentemente isolados como é o caso dos alagamentos no bairro do Bessa, ou em qualquer porção urbana localizada em planícies costeiras.

6.3. Diretrizes para a Gestão no Bairro do Bessa

*“Se conhecimento pode trazer problemas, não é sendo ignorante que poderemos solucioná-los.”
(Issac Assimov)*

Por fim, além dos aspectos gerais considerados anteriormente, algumas diretrizes mais específicas para a área do Bessa podem ser extraídas dos resultados obtidos. Estas podem ser consideradas *técnicas* (que dizem respeito aos aspectos técnicos da gestão de recursos hídricos) ou *de ocupação urbana* (que dizem respeito aos aspectos de planejamento urbano diretamente relacionados com a gestão de recursos hídricos no bairro) e são apresentadas a seguir:

1. A utilização de água subterrânea no bairro do Bessa pode e *deve* ser estimulada no que diz respeito a exploração de recursos do aquífero livre (freático);
2. A exploração de água subterrânea do aquífero livre deve ser regulada e controlada pelos órgãos competentes, respeitando-se os limites e condições estabelecidos pela análise;
3. O uso de água subterrânea, do freático, para irrigação de jardins, lavagens de carro (doméstica e comercial), lavagens de calçadas, de fachadas de edifícios, etc, deve ser estimulada e orientada segundo as vazões estabelecidas;
4. Os órgãos públicos responsáveis pela irrigação dos canteiros públicos no bairro e em demais locais da cidade devem adotar a prática do abastecimento de carros-pipas em poços de bombeamento localizados em locais públicos específicos (praças);
5. Recomenda-se a manutenção e desobstrução periódica dos canais de macro drenagem para que estes desempenhem satisfatoriamente sua função de dreno subterrâneo;
7. Recomenda-se o incentivo à construção de poços em qualquer edifício com mais de 20 unidades, através de mecanismos reguladores e de conscientização popular (associações de bairro, mídia, etc.);

8. Recomenda-se a construção ou ativação (no caso dos já construídos) de poços em todas as igrejas do bairro, entendendo que estas instituições também podem auxiliar no abastecimento de carros-pipa;

9. Recomenda-se a construção ou ativação (no caso dos já construídos) de poços em todas as mini-granjas ou residências de alto padrão do bairro e o estímulo ao uso da água subterrânea na manutenção das grandes áreas verdes pertencentes a estes imóveis;

10. Recomenda-se a implantação de áreas verdes nos lotes indicados pela análise, de forma a garantir um controle da recarga do aquífero;

11. Recomenda-se que nos locais de afloramento do lençol onde ainda existem lotes sem ocupação seja estimulada a implantação de lava-jatos, lavanderias, etc, para que seja viabilizada uma demanda para a construção de um poço;

Pode-se sugerir também uma reavaliação do da valoração imobiliária do bairro do Bessa. Alguns dos resultados obtidos pela análises pode ser considerados “indicadores de valoração” como é o caso das áreas apontadas pela análise como de “maior risco de alagamento”. Estas áreas podem apresentar uma menor valoração econômica com relação as demais, a depender da valoração inerente ao imóvel construído.

Há de se observar que as diretrizes acima podem vir a ser implementadas demandando para isso algum esforço institucional e legal para regulamentá-las. Entretanto, estas medidas não são suficientes para resolver *completamente* os problemas de gestão de recursos hídricos do bairro do Bessa. Intervenções integradas na macro e micro drenagem superficial do bairro, além de um controle mais rigoroso do uso do solo poderiam complementar os esforços realizados por este trabalho, no sentido de promover uma gestão inteligente e integrada das águas neste ambiente urbano costeiro.

Referências Bibliográficas

- ALCOFORADO, R. G. & CIRILO, J. A. (2001). Sistema de Suporte à Decisão para Análise, Previsão e Controle de Inundações. Em: **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 6, número 3, Setembro/Dezembro.
- AL-SABHAN W. et al. (2003). A real-time hydrological model for flood prediction using GIS and the WWW. In: **Computer Environment and Urban Systems** 27, 9–32. Ed. Pergamon.
- ATECEL/UFPB (1999), Associação Técnico-Científica Ernesto Luís de Oliveira Junior/ Universidade Federal da Paraíba. **Estudo do Comportamento do Aquífero Freático no Bairro do Bessa e de sua Influência sobre a Drenagem Superficial**. Relatório Final, SEPLAN/PMJP, João Pessoa.
- BIAN L. (2003). GIS for environmental modeling: an introduction (Editorial). In: **Computer Environment and Urban Systems** (In Press). Ed. Pergamon.
- BONHAM-CARTER, G. F. (1994). **Geographic Information Systems for Geoscientists**. Terrytown. Pergamon/Elsevier Science Publications.
- BRAGA, C. F. C. & RIBEIRO, M. M. R. (2001). **Experiências em Gerenciamento da Demanda Urbana de Água**. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa.
- BRAIL, R.K., KLOSTERMAN, R.E.(2001). **Planning Support Systems**, ESRI Press, Redlands, CA.
- BRASIL, **Lei nº 4.771** de 15 de Setembro de 1965. Institui o novo Código Florestal Nacional. Diário Oficial da União.
- BRASIL, **Lei nº 6.766** de 19 de Dezembro de 1979. Dispõe sobre o parcelamento do solo urbano e dá outras providências. Diário Oficial da União.
- BRASIL, **Lei nº 7.803** de 18 de Julho de 1989. Altera a redação da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e revoga as Leis nºs 6.535, de 15 de junho de 1978, e 7.511, de 7 de julho de 1986. Diário Oficial da União.
- BURROUGH, P. A. (1986). **Principles of Geographical Information System for Land Resources Assesment**. Claredon Press, Oxford.
- BURROUGH, P. A. et al. (1996). Spatial Data Quality and Error Analysis Issues: GIS Functions and Environmental Modeling. In: **Gis and Environmental Modeling: Progress and Research Issues**. World Books.
- BURROUGH, P. A. MCDONNELL R. A. (1998). **Principles of Geographic Information Systems**. Oxford, Oxford University Press.
- CABRAL, Jaime et. al. (2001). A problemática da drenagem urbana em áreas planas costeiras no Nordeste Brasileiro. Em: VILLANUEVA, A. et. al. (org.) **Soluções para a Drenagem Urbana em Países da América Latina**. Ed. ABRH, Porto Alegre.
- CÂMARA, Gilberto (2001). “Das coisas certas e incertas”. Em: **Revista Infogeo**. Número 21, Dezembro de 2001. Curitiba, Editora Espaço Geo.

- CÂMARA, Gilberto, MONTEIRO, A. M. V., MEDEIROS, J. S. (2002). Representações Computacionais do Espaço: Um Diálogo entre a Geografia e a Ciência da Geoinformação. Em: **Introdução à Ciência da Geoinformação**. Livro on-line, Divisão de Processamento de Imagens do INPE, São José dos Campos. URL: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-epistemologia.pdf>.
- CÂMARA, Gilberto, MOREIRA, Fábio R., BARBOSA, Cláudio, ALMEIDA FILHO, Raimundo, BÖNISCH, Simone (2002). Técnicas de Inferência Geográfica. Em: **Introdução à Ciência da Geoinformação**. Livro on-line, Divisão de Processamento de Imagens do INPE, São José dos Campos. URL: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap9-inferencia.pdf>.
- CARLSSON, Christer & TURBAN, Efraim. (2002) "Introduction DSS: directions for the next decad". In: **Decision Support Systems** 33 105–110. Ed. Elsevier.
- CARMON, Naomi et al. (1997). "Water-sensitive Urban Planning: Protecting Groundwater". In: **Journal of Environmental Planning and Management**, N° 40, University of Newcastle.
- CAVALHEIRO, Felisberto (1995). "Urbanização e Alterações Ambientais". Em: TAUK-TORNISIELO, Sâmia Maria et. al. (org.). **Análise Ambiental: Uma visão multidisciplinar**. Editora UNESP, São Paulo, 1995.
- CHIANG, W. H. et al (1998). **Aquifer Simulation Model for Windows**. Berlin, Borntraeger.
- CLARKE, M. (1990). "Geographical Information Systems And Model Based Analysis: Towards Effective Decision Support Systems". In H. J. Scholten, & J. C. H. Stillwell, **Geographical Information Systems For Urban And Regional Planning** (Pp. 165–175). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- DENSHAM P. J. & GOODCHILD, M. F. (1989). "Spatial decision support systems: A research agenda". In: **Proceedings GIS/LIS'89**, Orlando, FL., pp. 707-716.
- DENSHAM, Paul (1990). Unit 59 - Spatial Decision Support Systems. In: GOODCHILD, M.F., KEMP and K.K. (eds) (1990) **NCGIA Core Curriculum in GIS**. National Center for Geographic Information and Analysis, University of California, Santa Barbara CA.
- EASTMAN, J. R. (1999) "Multi-criteria evaluation and GIS". In: LONGLEY, P.A et al (Ed). **Geographical Information Systems – Principles and Technical Issues**. Volume 1, 2a. Ed., New York, John Wiley & Sons, Inc.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute, (2000). **ModelBuilder for ArcView Spatial Analyst 2 - An ESRI White Paper**. Redlands, May, 2000.
- FEICK Robert D. & HALL G. Brent (1999). Consensus-building in a Multi-Participant Spatial Decision Support System. In: **URISA Journal**, Vol. 11, No. 2, Summer 1999.
- FONSECA F. e EGENHOFER, M., (1999). Sistemas de Informação Geográficos Baseados em Ontologias, **Informática Pública** 1 (2): 47-65.
- FONSECA, F. (2001). **Ontology-Driven Geographic Information Systems**. Department of Spatial Information Science and Engineering. – The University of Maine Orono Maine.
- FOOTE, K. E e LYNCH, M (1996). Geographic Information Systems as an Integrating Technology: Context, Concepts, and Definitions. In: **The Geographer's Craft Project**. Departamento de Geografia, Universidade do Texas, Austin, TX. URL: <http://www.utexas.edu/depts/grg/gcraft/notes/intro/intro.html>.
- FOTHERINGHAM, A. S. & WEGENER, M. **Spatial Models and GIS: New Potential and New Models**. GISDATA 7 (series of European Science Foudation). Taylor & Francis, London.

- GALVÃO, Carlos de O. & VALENÇA, Mêuser Jorge S.(1999). **Sistemas Inteligentes:Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais**. Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre.
- GEHRELS, Hans (2001). Preface. In: **IAHS – International Association Hydrological Sciences Publication**. Número 269. IAHS Press, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, UK.
- GRABAUM, Ralf & MEYER, B.C. (1998). Multicriteria optimization of landscapes using GIS-based functional assessments. In: **Landscape and Urban Planning**, 43.
- GREEN, K (1996). Development of the Spatial Domain in Resource Management. In: STAIN, Morain (Ed.) (1996). **GIS Solutions in Natural Resource Management: Balancing the Technical-Political Equation**. OnWord Press. Santa Fe.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2002). **Atlas Nacional do Brasil - 4ª edição**, IBGE. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>.
- JANKOWSKI, P., NYERGES, T. (2001). **Geographic Information Systems for Group Decision Making**, Taylor & Francis, London.
- JANKOWSKI, P., NYERGES, T., SMITH, A., MOORE, T. J., & HORVATH, E. (1997). Spatial group choice: a SDSS tool for collaborative spatial decision-making. In P. Fisher, K. C. Clark, & B. Lees, **International Journal of Geographical Information Science** (Vol. 11; No. 6, September 1997).
- JIANG, H., EASTMAN, J.R., (2000). Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. In: **International Journal of Geographical Information Systems** 14, 173–184.
- JOÃO PESSOA. **Lei Municipal N° 2.102**, de 31 de Dezembro de 1975. Institui o Código de Urbanismo Integrante do Plano Diretor Físico do Município de João Pessoa, suas normas ordenadoras e disciplinadoras e dá outras providencias. Diário Oficial do Estado da Paraíba.
- JOÃO PESSOA. **Lei Municipal N° 2.699** de 07 de Novembro de 1979. Modifica o Código de Urbanismo aprovado pela Lei N° 2.102 de 31/12/1975. Diário Oficial do Estado da Paraíba.
- JOÃO PESSOA. **Lei Orgânica do Município de João Pessoa**, de 02 de Abril de 1990. Plenário da Assembléia Municipal Constituinte na Casa de Napoleão Laureano em João Pessoa no Estado da Paraíba.
- JOÃO PESSOA. **Plano Diretor do Município de João Pessoa**. Projeto de Lei Complementar N.º 4. de 30/04/93. Plenário da Assembléia Municipal Constituinte na Casa de Napoleão Laureano em João Pessoa no Estado da Paraíba.
- KELLY, Nina M. & TUXEN, Karin (2003). WebGIS for Monitoring “Sudden Oak Death” in coastal California. In: **Computer Environment. and Urban Systems**, 27, 527 a 547. Ed. Pergamon.
- KINGSTON R., CARVER, S. EVANS, A., TURTON, I. (2000). Web-based public participation geographical information systems: an aid to local environmental decision-making. In: **Computer Environment. and Urban Systems**, 24, 109 a 125. Ed. Pergamon.
- KLEIN, M. & METHLIE, L. (1990). **Expert Systems: A Decision Support Approach**. Addison-Wesley Publishing Co.
- LONGLEY, P.A., GOODCHILD, M.F., MACGUIRE, D.J., RHIND, D.W., 1999. **Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Applications, and Management**, John Wiley & Sons, New York.
- LUMMERTZ, Fábio Bauermann (1977). **Aspectos de Hidráulica Subterrânea na área da grande João Pessoa-PB**. Dissertação de Mestrado. Mestrado em Geociências, UFPE, Recife.

- MAGUIRE, D. 1991. An Overview and Definition of GIS. In: Maguire, D.; Goodchild, M.; Rhind, D. (eds) **Geographical Information Systems: Principles and Applications**. New York: John Wiley and Sons, pp. 9-20.
- MALCZEWSKI, J. (1997) "Spatial Decision Support Systems", **NCGIA Core Curriculum in GIScience**. URL: <http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u127/u127.html>, posted October 6, 1998.
- MALCZEWSKI, J. (2003) "GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview" (In Press). In: **Progress in Planning**. Ed. Elsevier.
- MALCZEWSKI, Jacek (1999). **Gis and Multicriteria Decision Analysis**. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.
- MANIEZZO, V. et al. (1998). "Decision support for siting problems". **Decision Support Systems**, 23 273–284.
- MARQUES, Josivan G. (2004). **Modelagem Espacial do Processo Decisório na Gestão de Recursos Hídricos em Ambientes Urbanos Costeiros**. Relatório de Pesquisa (Não-publicado). Campina Grande, UFCG.
- MENDES, Carlos André B. & CIRILO, José Almir (2001). **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação**. Porto Alegre, ABRH.
- MENDOZA, Guillermo A., ANDERSON, Alan B., GERTNER, George Z. (2002). Integrating Multi-criteria Analysis and GIS for Land Condition Assessment: Part I. In: **Journal of Geographic Information and Decision Analysis 2002**, Vol. 6, No. 1, pp. 1-16.
- MORESI, Eduardo Amadeu Dutra (2000). "Delineando o valor do sistema de informação de uma organização". **Ciência e Informação**. Brasília, v. 29, n. 1, p. 14-24, jan./abr. 2000.
- NCGIA (1990) **Research initiative 6: Spatial decision support systems**, NCGIA Technical Paper 90-5. UC Santa Barbara, September 1990.
- NCGIA (1996) **Report from the specialist meeting on collaborative spatial decision making, Initiative 17**, National Center for Geographic Information Analysis, UC Santa Barbara, September 17-21, 1995.
- NÓBREGA, Tânia Maria Q. (2002). **A problemática da drenagem em áreas urbanas planas: O caso da planície costeira da cidade de João Pessoa**. Dissertação de Mestrado, UFPB/CCEN, João Pessoa.
- OESA – Organização e Engenharia S.A. (1976). **Estudos de Reconhecimento e Estudos Hidrogeológicos para aproveitamento integrado: Região Centro Leste da Bacia Potiguar e Bacias Costeiras da Paraíba e Pernambuco (Área A)**. Estudos Hidrogeológicos, Relatório Final apresentado à SUDENE (Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste), Volume 3, Recife.
- OLIVEIRA, Francisco Borges de (2001). **Degradação do meio físico e implicações ambientais na Bacia do Rio Jaguaribe – João Pessoa - PB**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Pós-Graduação em Geociências. Recife, 2001.
- OLIVERA, Francisco (1996). **Spatially Distributed Modeling of Storm Runoff and Non-Point Source Pollution Using Geographic Information Systems**. (Doctoral Thesis). Faculty of the Graduate School of University of Texas at Austin.
- PARAÍBA. **Lei Estadual Nº 4.335** de 16 de dezembro 1981. Dispõe sobre Prevenção e Controle da Poluição Ambiental e estabelece normas disciplinadoras da espécie. Diário Oficial do Estado da Paraíba.

- PETTIT C. & PULLAR, D. (1999). An integrated planning tool based upon multiple criteria evaluation of spatial information. In: **Computer Environment and Urban Systems**, 23, 339-357. Ed. Pergamon.
- PORTO, Rubem La Laina e AZEVEDO, Luiz Gabriel T. de (1997). “Sistemas de Suporte a Decisão aplicados aos Recursos Hídricos. Em: Porto, R. La Laina et. al. (1997). **Técnicas Quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos**. Ed.Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre.
- PRUSKY F.F. et. al. (2001). **Sistema Especialista para o manejo integrado dos recursos hídricos**. UFV, Viçosa. URL:<http://www.iica.org.br/aguas>.
- REIS, Nestor Goulart (2000). **Evolução Urbana do Brasil 1500/1720**. Editora PINI, São Paulo.
- RINNER Claus & MALCZEWSKI Jacek (2003). Web-enabled spatial decision analysis using Ordered Weighted Averaging (OWA). In: **Journal of Geographical Systems**, 4: 385–403. Springer-Verlag.
- RINNER, Claus (2003). Web-based Spatial Decision Support: Status and Research Directions In: **Journal of Geographic Information and Decision Analysis**, 2003, Vol. 7, No. 1, pp. 14-31.
- ROCHA, Josenilson Patrício (1996). **A Restinga de Cabedelo-PB: Evolução das paisagens e modificações geo-ambientais entre 1969 e 1996**. Dissertação de Mestrado, UFPE/DCG, Recife, 1996.
- RUFINO, Iana A. A., GALVÃO, Carlos de O., REGO, Janiro C., ALBUQUERQUE, Patrocínio Tomaz (2003). Gestão das Águas e Planejamento Urbano em uma Área Costeira: Aspectos Técnicos e Legais. Em : **Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, ABRH, Curitiba.
- RS Virtual (2004). URL: <http://www.riogrande.com.br/Clipart/mapasbr/mapasbr1.html>.
- SAATY, T. L. (1980). **The Analytical Hierarchical Process**. McGraw-Hill, New York.
- SAGE, A. P. (1991). **Decision Support Systems Engineering**. New York, John Wiley & Sons.
- SANTOS, Milton (1996). **A Natureza do Espaço: Técnica e Tempo. Razão e Emoção**. São Paulo, Hucitec.
- SEFFINO, L.A et al (1999). WOODSS — a spatial decision support system based on workflows. In: **Decision Support Systems** 27, 105–123. Ed. Elsevier.
- SENDRA, Joaquín Bosque, MARTINEZ, Francisco J. E., HERNÁNDEZ Ernesto G., GARCÍA, María Jesús S (1994). **Sistemas de Información Geográfica: prácticas con PC-ARC/INFO e IDRISI**. RA-MA Editorial, Madrid.
- SENDRA, Joaquín Bosque. (1997). **Sistemas de Información Geográfica**. Ediciones Rialp, S.A. Madrid.
- SEPLAN-SECRETARIA MUNICIPAL DE PLANEJAMENTO (1998). **Mapa Urbano Básico Digital do Município de João Pessoa - PB**. Divisão de Geoprocessamento/SEPLAN, Prefeitura Municipal. João Pessoa, 1998.
- SHAMIR, Uri e CARMON, Naomi (1999). “Water-sensitive urban planning: the case of Israel’s coastal aquifer”. In: **Impacts of Urban Growth on Surface Water and Groundwater Quality (Proceedings of IUGG 99 Symposium HS5)**, IAHS Publications, número 259, 1999.
- SHIM, J.P. et al. (2002). “Past, present, and future of decision support technolog”. In: **Decision Support Systems**, 33, 111–126. Ed. Elsevier.

- SILVA, Ana Cristina S. et al (2002). Avaliação e espacialização das características dos poços do município de João Pessoa – Paraíba. Em: SILVA, Tarciso C. et al (org). **Bacia do Rio Gramame: Hidrologia e Aspectos Ambientais para Gestão dos seus Recursos Hídricos**. Editora UFPB, João Pessoa.
- SILVA, Ardemírio de Barros (1999). **Sistemas de Informações Geo-referenciada: Conceitos e Fundamentos**. Editora da UNICAMP, Campinas.
- SILVA, Jorge Xavier da (2001). **Geoprocessamento para análise ambiental**. Edição do Autor. Rio de Janeiro, 228p.
- SILVEIRA, José Augusto R. da. (1997). **Uma análise da relação transporte x uso do solo em vetores fragmentados de expansão urbana: estudo de caso do corredor da avenida D. Pedro II em João Pessoa – PB**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Arquitetura e Urbanismo/MDU-UFPE, Recife, 1997.
- SILVEIRA, José Augusto R. da. (2001). “Espaços Livres Públicos: Formação da Paisagem da Cidade de João Pessoa-PB”. Em: **Revista Conceitos**, ADUFPB, Volume 4 número 5, João Pessoa, 2001.
- SIMON, H.A. (1960). **The new science of management decision**. Nova York, Harper & Row.
- SOUZA FILHO, Francisco de Assis & GOUVEIA, Sila Xavier (2001). “Sistemas de Suporte às Decisões”. Em: CAMPOS, Nilson & STUDART, Ticiania (org.). **Gestão das Águas: Princípios e Práticas**. Porto Alegre, ABRH.
- SPRAGUE, R. H. & CARLSON, E. D. (1982). **Building Effective Decision Support Systems**. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc.
- SPRAGUE, R. H. & WATSON, H. J. (1996). **Decision support for management**, Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.
- STUDART, Ticiania M. de Carvalho & CAMPOS, José Nilson B. (2001). “Incertezas nas estimativas de vazão regularizada por um reservatório”. Em: **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 6, número 3, ABRH, Porto Alegre.
- TEIXEIRA, Armandio L. et al (1992). **Introdução aos Sistemas de Informação Geográfica**. Edição do Autor. Rio Claro, 1992.
- TUCCI, Carlos E. M. (2001). “Aspectos Institucionais do Controle das Inundações Urbanas”. Em: TUCCI, Carlos E. M. e MARQUES, David M. L da Motta (org.). **Avaliação e Controle da Drenagem Urbana**. Volume 2, ABRH, Porto Alegre, 2001.
- URDANETA, I. P. (1992). **Gestión de la inteligencia, aprendizaje tecnológico y modernización del trabajo informacional: retos y oportunidades**. Caracas: Universidad Simón Bolívar.
- VIEIRA, L.J.S., RÊGO, J.C., ALBUQUERQUE, J.P.T., GÓIS, R.S.S. (2001). “Um estudo da influência do aquífero freático sobre a drenagem superficial”. In: **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Aracaju: ABRH. Em CD-ROM.
- VIEIRA, Vicente (2001). “Análise de Risco”. Em: CAMPOS, N. & STURDART, T. (org.). **Gestão de Águas: Princípios e Práticas**. ABRH, Porto Alegre.
- WEST JR L.A. & HESS T.J. (2002). Metadata as a knowledge management tool: supporting intelligent agent and end user access to spatial data. In: **Decision Support Systems**, 32, 247–264.
- YAGER, R.R., (1988). On ordered weighted averaging aggregation operators in multi-criteria decision making. In: **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics** 18 (1), 183–190.

- YALDIR A.K., REHMAN T. (2002). A methodology for constructing multicriteria decision support systems for agricultural land consolidation using GIS and API: an illustration from Turkey. In: **Computers and Electronics in Agriculture** 36, 55-78. Ed. Elsevier.
- ZADEH L. A. (1965). **Fuzzy sets**. Information and Control, 8:338-353.
- ZERGER A., SMITH D.I. (2003). Impediments to using GIS for real-time disaster decision support. In: **Computer Environment. and Urban Systems** 27, 123–141. Ed. Pergamon.

Bibliografia Adicional Consultada

- ANIDO, Carlos (1999). “Monitoreo de Calidad y Cantidad de Aguas Subterráneas en cuencas con zonas rurales y urbanizaciones”. Em: anais do **II Encuentro de las Águas**. Montevideo.
- APRH (1997). Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos,. URL: <http://www.aprh.pt/AguaSubt2.htm>.
- ASSIS, José Chacon de (1999). “Ética e Cidadania na Gestão dos Recursos Hídricos: a experiência do movimento de cidadania pelas águas no Rio de Janeiro, Brasil”. Em: anais do **II Encuentro de las Águas**. Montevideo.
- BATTY, Michael et. al. (2000). **Visualizing the City: Communicating Urban Design to Planners and Decision Makers**. CASA - Centre for Advanced Spatial Analysis University College London (UCL), Paper 26, London.
- BRAGA, Benedito e GOBETTI, Lucas (1997). “Análise Multiobjetivo”. Em: Porto, R. La Laina et. al. (1997). **Técnicas Quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos**. Ed.Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre.
- BURROUGH, Peter A. (2000). “Whither GIS (as systems and as science)?”. Em **Computers, Environment and Urban Systems**. Número 24, páginas 1-3. Pergamon, Elsevier Science, Ltda.
- CABRAL, Jaime (1997). Movimento das águas subterrâneas. Em: FEITOSA, Fernando A. C. e JOÃO MANOEL FILHO (coord.). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. CPRM e LABHID/UFPE. Fortaleza.
- CÂMARA, Gilberto, et al (1996). **Anatomia de Sistemas de Informações Geográficas**. Campinas, Instituto de Computação, UNICAMP.
- CANTER, Larry W. (1995). **Manual de Evaluación de Impacto Ambiental** (Seg. Ed.). Mc GrawHill, Madrid.
- DAI, Jian e ROCKE, David M. (2000). “A GIS-based approach to spatial allocation of area source solvent emissions”. Em: **Environmental Modelling & Software**. Volume 15, páginas 293–302. Elsevier Science Ltda.
- DEL RIO Vicente (1990). **Introdução ao Desenho Urbano no Processo de Planejamento**. São Paulo, PINI.
- ESRI, (1997). **Arcview 3D Analyst: 3D Surface Creation, Visualization and Analysis**. Manual do Usuário, Environmental Systems Research Institute, USA.
- FELGUEIRAS, Carlos Alberto. “Modelagem Numérica do Terreno”. Em: Câmara, Gilberto et. al. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. Livro on-line, Divisão de Processamento de Imagens do INPE, São José dos Campos. URL: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>.

- FERRARI, Roberto. (1997) Colaboração: DAVIS Jr., Clodoveu, et al. **Viagem ao SIG, Planejamento Estratégico, Viabilização, Implantação e Gerenciamento de Sistemas de Informação Geográfica**. Curitiba, SAGRES..
- FORESTI, Celina e HAMBURGER, Diana Sarita. (1995) “Sensoriamento Remoto aplicado ao estudo do uso do solo urbano”. Em: TAUKE, Sâmia Maria. **Análise Ambiental: Uma visão multidisciplinar**. Editora UNESP, Segunda Edição, São Paulo.
- FREIRE, Cleuda Custódio Freire, RIBEIRO, Márcia Maria Rios e PEREIRA, Jaildo Santos (1999). “Aspectos Legais da Gestão das Águas Subterrâneas em Pernambuco-Brasil”. Em: anais do **II Encuentro de las Águas**. Montevideo.
- FREIRE, Cleuda. (1999). “Água Subterrânea: Cobrança e Outorga”. Em: anais do **II Encuentro de las Águas**. Montevideo.
- GALINDO, Rogério (1999). “IPPUC: A implantação do GEO em Curitiba”. In: **Revista Infogeo**. Editora Espaço GEO, Número 07, junho de 1999.
- GODOY NETO, Lázaro de, e MENDES, Carlos A. B. (1999). “Uso de Técnicas de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto na Obtenção de Planos de Informações para subsidiar a gestão de um manancial de abastecimento público: córrego lageado”. Em: anais do **II Encuentro de las Águas**. Montevideo, 1999.
- HASENACK, Heinrich & WEBER, Eliseu.(1999) “Derivação de Novas Informações Cadastrais para o Planejamento Urbano através de GIS”. In: **Fator GIS On Line**, Curitiba.
- IBAM (1994). Instituto Brasileiro de Administração Municipal. “Desenvolvimento Urbano e Gestão Municipal”, em **Plano Diretor em Municípios de pequeno porte: documento básico**. Programa Nacional de Capacitação. Convênio IBAM-MIR/SDU/Secretaria de Relações com Estados e Municípios. Rio de Janeiro, 128p.
- LEAL, Onofre (1994). **Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas da Região Metropolitana do Recife**. Série Recursos Hídricos, Volume 2. Projeto SINGRE, Recife.
- LEANIZ, P. G. G; VALVERDE, A. L. A; LORENZO, F. E. (1996). “Sistema Soporte de Decisión Multicriterio para la Priorización y ordenación de Proyectos de Desarrollo y Gestión de Recurso Hidráulicos”. In: **Ingenieria Civil**, número 104, CEDEX, Madrid.
- LEMONS, David (1996). **A utilização de Sistemas Especialistas para diagnóstico o uso do solo e seus limites de ocupação**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Produção), UFSC. Florianópolis.
- LOFFET, A. apud VARSHOSAZ, Masood. (1996). **3D models for Telecommunications-Methods and applications**. OEEPE workshop, 3D city models.
- LOFFET, A. apud VARSHOSAZ, Masood.(1996). **3D models for Telecommunications-Methods and applications**. OEEPE workshop, 3D city models.
- PORTO, Rubem La Laina e AZEVEDO, Luiz Gabriel T. De (1997). “Sistemas de Suporte a Decisão aplicados aos Recursos Hídricos”. Em: Porto, R. La Laina et. al. (1997) **Técnicas Quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos**. Ed.Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre.
- RIBEIRO, Márcia Maria Rios (2001). **Gestão de Recursos Naturais**. Apostila de Curso (Não publicado). AERH/CCT/UFPB, Campina Grande.

- SAKAMOTO, Ai e FUKUI, Hiromichi (2000). “An Internet-GIS based Environment Evaluation System by Multi-Criteria Analysis”. Em: **4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4):Problems, Prospects and Research Needs**. Banff, Alberta, Canada, September 2 – 8.
- SANTOS Jorge de los (coord.) (2000). **Projeto: Guia Para Educação Básica Sobre A Proteção Das Águas Subterrâneas**. Iniciativa: PHI/UNESCO/Universidad de la Republica (Uruguay)/Universidade Nacional de Lapampa (Argentina). URL : <http://www.meioambiente.pro.br/agua/cartilha/inicio.htm>.
- SEMARH (1998). Secretaria Extraordinária dos Recursos Hídricos e Minerais. **Plano Diretor de Recursos Hídricos – Diagnóstico do Estado**.
- SIMÃO, Antonio Júlio Veiga & CARVALHO, Maria Manuel Rodrigues (1999). “Aplicação de Modelos Digitais de Terreno ao Estudo Físico do Território”. In: **Fator GIS on Line**. Curitiba.
- SPINELLI, Juçara et.al. (1995). Inclusão de Variáveis Hidrológicas no Planejamento Urbano. In: **Anais do VI ENA**. Brasília.
- UNDERHILL, S. A. (1994) “Groundwater Flow and Transport Modeling Within A Geographic Information System”. In: **Groundwater Management**.
- VARSHOSAZ, Masood. (1997). **Modelling of Buildings for 3D GIS**. Tese de Doutorado, University College of London,. London.
- ZIMBRES, Eurico (2000). **Guia Avançado sobre Água Subterrânea**. Site: “Meio Ambiente pro BR”. UERJ, Faculdade de Geologia. URL: <http://www.meioambiente.pro.br/agua/guia/aguasubterranea.htm>.