



**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA**

**Dimensionamento e Localização de Ecopontos  
para a Baixa de Coimbra  
com Metodologia Multicritério e Tecnologia SIG**

Elisabete dos Santos Veiga Monteiro  
Licenciada em Engenharia Geográfica, FCTUC

Dissertação submetida ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Urbana

**Coimbra, 2007**



## RESUMO

*Os sistemas eficientes de recolha selectiva de resíduos estão na base da qualidade e protecção do ambiente a atingir por qualquer moderno Sistema de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos. O objectivo deste trabalho foi a aplicação do conceito subjacente aos Sistemas de Apoio à Decisão com forte componente espacial a um caso de estudo no domínio da gestão de resíduos sólidos urbanos: a localização de ecopontos na Baixa de Coimbra (um ecoponto consiste num grupo de contentores, localizados num local público, para recolha selectiva de resíduos: papel, vidro, plástico e resíduos orgânicos). O estudo inclui um levantamento dos tipos de equipamentos existentes no mercado mais adequados à instalação na particular área da cidade em estudo (centro histórico), onde muitas das ruas e outros espaços públicos apresentam dimensões exíguas ou mesmo insuficientes para a circulação e operação de muitos dos modernos veículos de recolha de resíduos sólidos urbanos. É seguida uma abordagem multicritério, onde foram considerados quatro critérios (ou objectivos): minimização do número de produtores de resíduos (residentes, serviços/comércio) que se situam até 10 metros de qualquer ecoponto; minimização do número de fracções que se situam a mais de 100 metros do respectivo ecoponto; minimização da média das distâncias a serem percorridas pelos utilizadores até aos ecopontos; minimização do custo do sistema. As soluções para o modelo usado foram geradas com um servidor de algoritmos já existente, usando técnicas de optimização convencionais e produzindo como dados de saída: a capacidade e o local de instalação de cada ecoponto, a afectação dos produtores de resíduos, o custo, o número de produtores de resíduos para os respectivos intervalos ([0-10m]; ]10 m, 100 m]; > 100m) e os comprimentos dos percursos dos utentes. Foram geradas várias soluções, representadas por mapas com a afectação dos edifícios aos respectivos ecopontos através de códigos de cor, recorrendo a tecnologia SIG. Estas foram comparadas através da análise dos compromissos entre os objectivos, recorrendo a técnicas de comparação apropriadas (designadamente no espaço dos objectivos). Isto permitiu retirar conclusões relativamente ao caso em estudo e às técnicas de análise e apoio à decisão adoptadas.*

## ABSTRACT

*Efficient selective waste collection systems are the base for achieving environmental protection and quality in the framework of any modern urban waste management system. The aim of this study was to apply the spatial decision support system concept to a case study in the field of urban waste management: the location of "ecopontos" in Coimbra downtown (an "ecoponto" consists of a group of containers, located at a public point, for selective collection of waste - paper, plastic, glass and also organic waste). The study also includes a survey on available containers adequate to be installed in the old part of the city under study, where many streets and other public spaces are too narrow for the circulation and operation of many modern waste collection trucks. A multicriteria approach was followed, where four criteria (or objectives) were considered: minimization of the number of waste producers (residents and services/commerce) too close to any "ecoponto" ( $\leq 10m$ ), minimization of the number of users too far from the respective "ecoponto" ( $> 100m$ ), minimization of the average distance to be walked to the "ecopontos", and minimization of the cost of the system. Solutions were generated with an existing algorithm server using standard techniques and giving as output: the size and location of each "ecoponto", the assignment of the waste producers to the "ecopontos", the cost, the number of waste producers at each distance interval ([0-10m]; ]10 m, 100 m]; > 100m) and lengths of the users paths home-"ecoponto" through the streets network. Several solutions were generated and represented by color-coded maps using Geographical Information Systems (GIS) technology. They were also compared by analyzing the tradeoffs among objectives using adequate techniques of comparison (namely in the objectives space). This allowed drawing conclusions relative to the case study analyzed and the decision support techniques used.*

**LISTA DE ABREVIATURAS**

<b>BAGAL</b> – Best Against The Least	56
<b>BD</b> – Base de Dados	22
<b>DEC</b> – Departamento de Engenharia Civil	2
<b>IG</b> – Informação Geográfica	19
<b>FCTUC</b> – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Colimbra	2
<b>GPS</b> – Global Positioning System	19
<b>PPC</b> – Problema do $p$ -centro	15
<b>PPM</b> – Problema da $p$ -mediana	16
<b>RSU</b> – Resíduos Sólidos Urbanos	9
<b>SAD</b> – Sistema de Apoio à Decisão	25
<b>SADE</b> – Sistemas de Apoio à Decisão Espacial	1
<b>SIG</b> – Sistemas de Informação Geográfica	1
<b>SGBD</b> – Sistema de Gestão de Bases de Dados	1
<b>SI</b> – Sistema de Informação	21
<b>SIGUrb</b> – Sistema de Informação e Gestão Urbana	1

### **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar uma referência muito especial ao Professor Doutor João Manuel Coutinho Rodrigues, pela forma incentivadora que sempre demonstrou no desenvolvimento deste estudo e também pela capacidade de orientação e visão interdisciplinar que sempre lhe apreciei e considero tão importante.

Ao Professor Doutor Lino Tralhão, como não poderia deixar de ser, quero deixar um muito especial agradecimento pelo incessante apoio e colaboração que me deu desde o primeiro momento em que este estudo teve início. Foi de facto incrível a sua colaboração neste trabalho de quem sempre ficarei grata.

Ao Professor Doutor Luís Alçada, pela sua capacidade de entreaajuda, mas também pela colaboração prestada ao longo do desenvolvimento dos trabalhos. Fico reconhecida por todo o apoio prestado.

Aos mestres Luís Santos, Agostinho Jordão e Eduardo Natividade, pela colaboração e entreaajuda que sempre ofereceram. Estendo também este agradecimento aos jovens técnicos que passaram pelo Projecto SIGUrb no decurso da realização deste trabalho.

Agradeço também ao Laboratório de Urbanismo, Ordenamento e Transportes do Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, pela colaboração prestada e por me ter permitido a utilização de equipamentos.

Ao INESC - Coimbra, pelo apoio institucional e logístico dado.

O meu agradecimento também à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico da Guarda, Departamento de Engenharia Civil e Secção de Ciências Geográficas. A todos os meus colegas do DEC/ESTG/IPG pelo incentivo. Não poderia aqui deixar esquecer o meu querido colega e

amigo "Professor Jorge Amado" que já não está entre nós e que tanto me incentivou para terminar com êxito estas provas, onde quer que ele esteja também a ele a dedico e agradeço.

Agradeço também ao Departamento de Ambiente Higiene e Segurança da Câmara Municipal de Coimbra e da Câmara Municipal da Guarda, pela colaboração e informação disponibilizada. Às empresas Resopre Ambiente, TNL e ERSUC pela colaboração e informação disponibilizada.

Agradeço a todos as minhas amigas e amigos pelo apoio e incentivo.

Por último mas o não menos importante, o agradecimento muito especial a toda à minha família, pais, irmãos, cunhados e sobrinhos, que sempre me apoiaram e acarinharam para a conclusão destas provas.

Finalmente, o meu reconhecimento a todas as outras pessoas que aqui não foram referidas explicitamente mas que de alguma forma, directa ou indirecta, tornaram possível a concretização deste trabalho.

A todos, o meu Bem-haja.

Coimbra, Dezembro de 2007

## ÍNDICE GERAL

<b>RESUMO</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>II</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE GERAL</b>	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE QUADROS</b>	<b>IX</b>
<b>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO II - LOCALIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS À ESCALA URBANA OU REGIONAL</b>	<b>4</b>
1. INTRODUÇÃO	4
2. MODELOS DE LOCALIZAÇÃO-AFECTAÇÃO	5
2.1 <i>Considerações Gerais</i>	5
2.2 <i>Classificação dos Modelos de Localização</i>	6
2.2.1 Conceitos Gerais sobre Redes	7
2.2.2 Modelos planares, em rede e de localização discreta	8
2.2.3 Caracterização de modelos quanto à métrica utilizada	9
2.2.4 Caracterização quanto ao número de equipamentos	10
2.2.5 Modelos de localização estáticos e dinâmicos	10
2.2.6 Modelos determinísticos e estocásticos	10
2.2.7 Caracterização quanto ao número de serviços	11
2.2.8 Modelos monobjectivo e modelos multiobjectivo	11
2.2.9 Modelos do sector público e do sector privado	11
2.2.10 Modelos de Localização de equipamentos desejáveis e indesejáveis e semi indesejáveis	12
2.3 <i>Localização de Contentores de Resíduos Sólidos Urbanos</i>	13
3. ALGUNS PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO	14
3.1 <i>Problemas de Cobertura</i>	14
3.2 <i>Problemas Centrais ou Problemas p-Centro</i>	15
3.3 <i>Problemas de p-Mediana</i>	17
<b>CAPÍTULO III - OS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA NO APOIO À DECISÃO</b>	<b>20</b>
1. INTRODUÇÃO	20
2. SISTEMAS DE INFORMAÇÃO	21
3. CONCEITO DE SIG	22
4. "ORIGEM" E EVOLUÇÃO DOS SIG	24
5. OS SIG E OUTROS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO	26
5.1 <i>Os Sistemas de Gestão de Bases de Dados (SGBD)</i>	26
5.2 <i>Sistemas de Apoio à Decisão (SAD)</i>	27
6. A INFORMAÇÃO DO SIG	28
6.1 <i>Dados alfanuméricos</i>	28
6.2 <i>Dados gráficos</i>	30
6.2.1 Estrutura Raster	30
6.2.2 Estrutura vectorial	31
7. COMPONENTES FUNCIONAIS DE UM SIG	32
8. OS SIG NO APOIO À DECISÃO	34

<b>CAPÍTULO IV - CASO DE ESTUDO: LOCALIZAÇÃO DE ECOPONTOS NA BAIXA DE COIMBRA</b>	<b>36</b>
1. DEFINIÇÃO DO CASO DE ESTUDO .....	36
1.1 <i>Introdução</i> .....	36
1.2. <i>Enquadramento legislativo</i> .....	37
1.3. <i>Área de estudo</i> .....	38
1.4 <i>Resíduos sólidos urbanos e pontos de recolha (ecopontos)</i> .....	40
1.4.1 Tipos de ecopontos e de resíduos.....	40
1.4.2 Quantidades de resíduos produzidos.....	45
1.4.3 Locais Candidatos .....	47
1.5 <i>A Rede</i> .....	51
1.6. <i>Distâncias Sectores-Candidatos</i> .....	54
2. ABORDAGEM À AVALIAÇÃO MULTIOBJECTIVO.....	56
2.1 <i>Princípios</i> .....	56
2.2. <i>Soluções</i> .....	58
3. OBJECTIVOS .....	59
3.1 <i>Modelo Matemático</i> .....	60
<b>CAPÍTULO V - GERAÇÃO DE SOLUÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	<b>66</b>
1. INTRODUÇÃO .....	66
2. INSTÂNCIA "SORESIDENTES" .....	68
3. INSTÂNCIA "TODOS".....	74
4. INSTÂNCIA "RENOVAÇÃO" .....	75
4. ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS .....	77
<b>CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS</b> .....	<b>79</b>
<b>ANEXO</b> .....	<b>82</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>96</b>

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 2.1: Intervalo de aceitação.....	13
Figura 3.1: Esquema da interacção entre a BD gráfica e a BD alfanumérica .....	24
Figura 3.2: Representação esquemática de uma estrutura raster.....	30
Figura 3.3: Exemplo de uma estrutura vectorial .....	31
Figura 4.1: Planta da zona em estudo .....	39
Figura 4.2: Marcos de deposição de resíduos.....	41
Figura 4.3: Sistema de ecopontos com abertura em ângulo recto .....	41
Figura 4.4: Sistema de ecopontos com elevação na vertical.....	42
Figura 4.5: Locais candidatos.....	48
Figura 4.6: Sectores intermédios dum arco e sectores junto a nós.....	51

### ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1: Estrutura relacional de uma BD cadastral .....	29
Quadro 4.1: Estrutura da tabela "ECOPONTOS" .....	43
Quadro 4.2: Tabela "TIPOSRECOLHA" .....	44
Quadro 4.3: Estrutura da tabela "NAORESIDENCIAIS" .....	45
Quadro 4.4: Estrutura da tabela "CAEPESOS" .....	45
Quadro 4.5: Densidades dos 4 tipos de resíduos .....	46
Quadro 4.6: Estrutura da tabela "RESIDENTES" .....	47
Quadro 4.7: Estrutura da tabela "CANDIDATOS" .....	49
Quadro 4.8: Estrutura do ficheiro "CANDIDATOS_ECOPONTOS" .....	50
Quadro 4.9: Estrutura da Tabela "TOPOLOGIAREDE" .....	53
Quadro 4.10: Estrutura da tabela "CAMINHOS" .....	53
Quadro 4.11: Tabela "SECTORES_CANDIDATOS" .....	55
Quadro 5.1: Tabela "ECOPONTOS", para a solução "Goal Linf", instância "SORESIDENTES" .....	68
Quadro 5.2: Tabela "TIPOSRECOLHA", para a solução "Goal Linf", instância "SORESIDENTES" .....	69
Quadro 5.3: Plano de colocação dos ecopontos, solução "Goal Linf", instância "SORESIDENTES" .....	69
Quadro 5.4 – Afectação de edifícios aos candidatos abertos, solução "Goal Linf", instância "SORESIDENTES" .....	72
Quadro 5.5: Tabela "ECOPONTOS", para a solução "Goal L1", instância "TODOS" .....	75
Quadro 5.6: Programa de áreas para cada tipologia justificado por compartimentos .....	77
Quadro 5.7: Dispersão da distribuição dos ecopontos .....	78

**ÍNDICE DE FIGURAS EM ANEXO**

Figura A.1: Quadro dos Resultados para a instância "SORESIDENTES" .....	83
Figura A.2: Gráfico de colunas para a instância "SORESIDENTES" .....	84
Figura A.3: Diagrama de afectações de edifícios, para a solução "Goal Linf" da instância "SORESIDENTES", .....	85
Figura A.4: Diagrama de pormenor de afectações de edifícios, para a solução "Goal Linf" da instância "SORESIDENTES", revelando os códigos de afectação.....	86
Figura A.5: BAGAL para a instância "SORESIDENTES" .....	87
Figura A.6: Quadro": Quadro dos Resultados para a instância "TODOS" .....	88
Figura A.7: Quadro": Gráfico de colunas para a instância "TODOS" .....	89
Figura A.8: Diagrama de afectações de edifícios, para a solução "Goal L1" da instância "TODOS" ....	90
Figura A.9: BAGAL para a instância "TODOS". .....	91
Figura A.10: Quadro": Quadro dos Resultados para a instância "RENOVAÇÃO" .....	92
Figura A.11: Quadro": Gráfico de Colunas para a instância "RENOVAÇÃO" .....	93
Figura A.12: Diagrama de afectações de edifícios, para a solução "Goal Linf" da instância "RENOVAÇÃO" .....	94
Figura A.13: BAGAL para a instância "RENOVAÇÃO" .....	95

# Capítulo I - Introdução

---

O crescimento e desenvolvimento das cidades provocaram ao longo dos tempos um incremento no nível de complexidade dos sistemas urbanos. Estes, de que são exemplo os Sistemas de Gestão de Resíduos Sólidos, os Sistemas de Abastecimento de Águas, os Sistemas de Saneamento Básico e os Sistemas de Transportes, envolvem, tanto nas fases de projecto e de construção como na de gestão, a abordagem e resolução de problemas de optimização, não raras vezes forçando o compromisso entre aspectos em conflito. A enorme importância destes sistemas pode ser identificada a vários níveis (social, económico, ambiental, etc.), sendo possível enumerar importantes impactes, tanto do lado dos custos, como na vertente dos benefícios (Coutinho-Rodrigues, 2004). O grau de complexidade inerente a este tipo de problemas resulta das múltiplas dimensões a ter em conta, e até da compatibilização dos vários interesses envolvidos.

A fundamentação das decisões relacionadas com tão importantes processos, deve ser efectuada de modo a reduzir a ambiguidade e justificar devidamente as opções tomadas. Para tal, têm vindo a ser desenvolvidas e aperfeiçoadas abordagens para o apoio à decisão, envolvendo a consideração de múltiplos critérios em simultâneo, de forma a aproximar os modelos da realidade.

Indubitavelmente, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) constituem uma excelente ferramenta de auxílio aos processos de Planeamento e Gestão Urbana, em diversas fases. Da sua combinação com modelos formais, oriundos do domínio da Investigação Operacional, podem resultar poderosos sistemas, os Sistemas de Apoio à Decisão Espacial (SADE), para a resolução de problemas com fortes componentes de natureza espacial, como o Planeamento e Gestão Urbanas, permitindo gerar soluções sobre diversos formatos, em particular a sua apresentação sob a forma gráfica, melhor iluminando os agentes de

---

---

decisão quanto às opções a tomar e permitindo a integração dos actores do Processo de Planeamento (Ayeni, 1997).

É neste contexto que se apresenta um estudo para a localização e dimensionamento de ecopontos no centro histórico da cidade de Coimbra – Baixa de Coimbra.

Neste estudo efectuou-se a aplicação do conceito subjacente aos SADE, servindo-se de várias componentes pré-existentes: (i) um modelo multiobjectivo (Tralhão *et al*, 2008); (ii) um servidor de algoritmos (Alçada, 2006); (iii) tecnologia Web-SIG interligada com um Sistema de Gestão de Base de Dados (SGBD) que incorpora um Sistema de Informação e Apoio à Gestão Urbana (SIGUrb) desenvolvido no DEC-FCTUC. O SIGUrb contempla a integração de informação de natureza alfanumérica (designações, descrições, datas, diferentes valores numéricos, etc.), gráfica (fotografias digitais, plantas, etc.) e espacial (associação das anteriores a localizações precisas num mapa representativo da zona em estudo). O servidor de algoritmos, também ele um SGBD, permite a introdução do modelo multiobjectivo usado, a sua resolução e, em interacção com o SIGUrb a apresentação dos resultados para visualização gráfica.

Inserir-se também este estudo no tema da Localização de equipamentos/serviços semi obnoxios ou semi indesejáveis, serviços caracterizados por possuírem dois grupos de objectivos específicos: os de atracção (traduzem o desejo das pessoas no sentido da sua proximidade) e objectivos de repulsão (traduzem a preferência das pessoas pela sua implementação o mais longe possível). Para a resolução deste problema foi utilizado o modelo multiobjectivo presente em (Tralhão *et al*, 2008). O modelo incorpora quatro objectivos: um relativo à minimização do custo total dos ecopontos, outro que minimiza o número de pessoas situadas demasiado próximo (10 ou menos metros) dos ecopontos, um terceiro que minimiza o número de fracções situadas longe (mais de 100 metros) dos respectivos ecopontos e, por último, a minimização do comprimento médio do percurso de acesso aos ecopontos.

As soluções obtidas permitem auxiliar o agente de decisão na escolha e localização dos ecopontos. Foram usados dados referentes ao município de Coimbra sobre a produção diária de resíduos (papel, vidro, plástico e outros resíduos indiferenciados) por habitante, juntamente com dados, relativos aos não residentes, essencialmente estabelecimentos

comerciais e alguns serviços (bancos, escritórios de advocacia), obtidos por amostragem com base num inquérito realizado *in loco*.

As soluções podem ser visualizadas graficamente, por exemplo, através da sua representação em mapas da zona urbana em estudo.

As soluções produzidas indicam o número de ecopontos a serem instalados, as respectivas capacidades para os vários tipos de resíduos mencionados, bem como a sua localização. Além disso, as soluções também indicam quais os ecopontos que cada pessoa deverá utilizar na deposição dos seus resíduos, ou seja as afectações dos utentes aos ecopontos.

Este trabalho está organizado da seguinte forma, no Capítulo II, "Localização de Equipamentos à Escala Urbana ou Regional", abordam-se temas pertinentes no campo da Localização, nomeadamente a caracterização dos problemas de localização segundo determinadas características: problemas monobjectivo ou multiobjectivo, estáticos ou dinâmicos, públicos ou privados, estocásticos ou determinísticos, entre outros. No Capítulo III, "Os Sistemas de Informação Geográfica no Apoio à Decisão", pretende dar-se ênfase aos SIG, abordando-se a sua definição, características funcionais, e a sua utilização no domínio do Apoio à Decisão para resolução de problemas reais. No Capítulo IV, "Caso de Estudo: Localização de Ecopontos na Baixa de Coimbra", reproduz-se o modelo utilizado, definindo o problema a tratar, os dados e os objectivos a otimizar, juntamente com uma breve introdução aos problemas multiobjectivo. O Capítulo V, "Geração de Soluções e Análise de Resultados" é dedicado à geração, análise e apresentação de resultados, sua comparação em diferentes cenários, quer no espaço dos objectivos, quer sobre mapas da cidade obtidos em ambiente SIG. Finalmente, apresentam-se, no Capítulo VI, algumas conclusões e pistas para investigação futura. Em anexo surgem alguns quadros, esquemas e mapas referentes a resultados obtidos.

# Capítulo II - Localização de Equipamentos à Escala Urbana ou Regional

---

## 1. Introdução

O estudo científico da localização de equipamentos, no âmbito do Planeamento Territorial e Urbano teve o seu início, como disciplina autónoma em 1970, (Johns Hopkins Magazine, 1997) quando Charles ReVelle publicou o primeiro artigo relativo ao estudo da localização de hospitais, problema proposto pelo então presidente dos Estados Unidos da América, Lyndon B. Johnson. Recorrendo a ferramentas de optimização e de programação linear, desenvolveu um modelo que incorporava os centros populacionais (procura) e determinou conjuntos de pontos (locais) onde os hospitais poderiam ser localizados, de forma a minimizar a distância média a percorrer pelos utentes. O artigo "Central Facilities Location" (ReVelle e Swain, 1970) é pois uma referência no domínio da Localização.

O crescente interesse na modelação de problemas de localização deve-se a diversos factores. Em primeiro lugar, trata-se de decisões a serem tomadas em todos os níveis de organização humana, desde o individual e/ou familiar, passando pelos governos até às agências ou instituições internacionais. Em segundo lugar, tais decisões podem revestir-se de elevados impactes económicos, sociais e ambientais ao envolverem recursos significativos, podendo esse impacte estender-se a longo prazo. Se uma família habita perto de uma escola primária, possui a vantagem dos filhos não necessitarem de recorrer a

transportes públicos para se deslocarem para a escola. Uma família que viva perto de um centro cultural ou recreativo poderá mais facilmente envolver os seus filhos nessas actividades. Contudo, uma habitação localizada próximo de uma fábrica sofrerá os efeitos de ruído, tráfego ou poluição provenientes dessa fábrica, o que pode degradar, de forma significativa, a qualidade de vida dos seus habitantes.

Estes exemplos evidenciam a importância que encerra a decisão de localização, o que contribui para o esforço de investigação desenvolvido nesta área.

Em termos gerais, os problemas de localização são caracterizados pela existência de um conjunto de pontos onde se encontra a procura de determinados equipamentos, um outro conjunto de pontos onde se pretende localizar novos equipamentos, podendo ainda em alguns casos existir pontos onde alguns desses equipamentos já existem. Trata-se de encontrar localizações para os novos equipamentos, tendo em conta certos critérios ou objectivos, como por exemplo, a minimização das distâncias a percorrer, do risco, do tempo e a minimização do custo.

Lidando normalmente com questões de natureza espacial, torna-se frequentemente pertinente a inclusão de técnicas de localização nos Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Neste capítulo pretende-se, numa primeira fase, efectuar uma abordagem a conceitos gerais sobre Localização; de seguida faz-se referência a algumas categorias de modelos.

## **2. Modelos de Localização-Afectação**

### **2.1 Considerações Gerais**

Os modelos de localização envolvem a selecção de um conjunto de localizações para certos equipamentos e a atribuição (affectação) da procura a esses equipamentos, de forma a otimizar grandezas, designadas por "objectivos", normalmente funções de variáveis relacionadas com as localizações desses equipamentos, como por exemplo:

- Quantos equipamentos devem ser localizados?
- Onde deverá ser localizado cada equipamento?

- Qual a dimensão de cada equipamento?
- Qual a fracção de procura que deverá ser afectada a esses equipamentos ou serviços?

Os modelos incorporam normalmente as seguintes componentes:

- Os clientes/utentes: localizados em pontos, nós de uma rede (vide secção 2.2.1 deste capítulo), ou poderão estar distribuídos (ao longo dos itinerários) sobre os arcos da mesma rede;
- Os equipamentos a serem localizados;
- O espaço, no qual os clientes/utentes e equipamentos são localizados;
- Uma métrica<sup>1</sup>, ou seja uma metodologia de cálculo, relativa a distâncias<sup>2</sup> ou tempos de percurso entre a procura e os equipamentos.

A formulação destes modelos exige uma cuidada compreensão dos fenómenos reais a tratar, de forma a ficarem adequadamente representados nos próprios modelos, o que torna a Localização não só uma ciência mas também uma arte, (Daskin, 1995).

Convém notar que há também um certo compromisso entre a aproximação do modelo à realidade e a tratabilidade computacional deste.

## 2.2 Classificação dos Modelos de Localização

Existem diversas classificações de modelos de localização. Apresenta-se de seguida uma classificação (Daskin, 1995) baseada em características como a distribuição da procura, a métrica utilizada, o número de equipamentos, número de objectivos (monobjectivo e multiobjectivo), entre outros. Convém previamente fazer breve introdução ao conceito de rede.

---

<sup>1</sup> Uma **métrica** definida no conjunto  $A$  é, basicamente, um método de medição de distâncias entre os pontos desse conjunto. Formalmente, (Daskin, 1995) é uma função do tipo  $A^2 \rightarrow \mathfrak{R}_0^+$ , que a cada ponto  $(i, j) \in A^2$ , faz corresponder um real não negativo,  $d(i, j)$ , distância entre os pontos, sujeita às condições:

$$i) d(i, j) = d(j, i), \forall i, j \in A$$

$$ii) d(i, j) \leq d(i, k) + d(k, j), \forall i, j, k \in A$$

<sup>2</sup> Por exemplo, a distância entre dois locais de uma cidade será o comprimento das vias (ruas) do percurso entre esses dois locais (pontos) e não a distância euclidiana (em linha recta).

### 2.2.1 Conceitos Gerais sobre Redes

No dia a dia são inúmeros os problemas reais estudados recorrendo a redes. O mapa representativo das ruas de uma cidade é talvez o exemplo mais comum de uma rede física, sendo muitos os problemas de planeamento em redes que surgem neste contexto, (Rodrigues-Coutinho, 2007). Ao nível do planeamento urbano a gestão e monitorização de infra-estruturas viárias, hidráulicas, de saneamento higiene e limpeza numa determinada porção de território é também um exemplo da aplicação de redes.

Antes de avançar para uma definição do conceito de rede importa abordar um conceito situado a montante, o de grafo. Limitamo-nos ao conceito de grafo não orientado por ser o de interesse para o presente trabalho.

Basicamente um grafo é constituído por dois conjuntos, o conjunto dos nós e um conjunto de arcos que ligam esses nós. Em termos formais:

**Definição:** Um grafo (não orientado)  $G=(V,E)$  é um par ordenado constituído pelos conjuntos (finitos e indexados) seguintes:

- i)  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  cujos elementos são designados por nós, nodos ou vértices; em que  $n$  é o seu número;
- ii)  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ , conjunto indexado de  $m$  arcos ou arestas; cada aresta corresponde a um par  $\{x, y\}$ ,  $x, y \in V$ , de nós e representa uma linha, ou ligação, entre esses dois nós.

No contexto dos grafos interessa apresentar os seguintes conceitos:

**Definição:** Uma cadeia,  $\zeta = (v_1, e_1, \dots, e_k, v_{k+1})$ , é uma sequência composta alternadamente por nós e arcos. O primeiro elemento de uma cadeia,  $v_1$ , e o último,  $v_{k+1}$ , são nós, respectivamente o nó inicial e o nó final dessa cadeia.

**Definição:** Um caminho é uma cadeia,  $\chi = (v_1, e_1, \dots, e_k, v_{k+1})$ , em que todo o arco liga o nó situado imediatamente antes ao situado imediatamente após, ou seja, em que todo arco,  $e_i \in \chi, i=1, \dots, k, e_i = \{v_i, v_{i+1}\}$ . Diz-se que esse caminho liga o nó  $v_1$  ao nó  $v_{k+1}$ .

Como, num caminho, os sucessivos arcos são determinados pelos nós presentes nesse caminho, basta a sequência,  $(v_1, v_2, \dots, v_{k+1})$ , dos nós, para a sua definição.

Um ciclo é uma cadeia em que  $v_1 = v_{k+1}$ . Um circuito é um caminho em que  $v_1 = v_{k+1}$ .

Um grafo diz-se conexo se qualquer par de nós, é constituído pelo nó inicial e o nó final de pelo menos um caminho.

Para designar genericamente, cadeia, caminho, ciclo ou circuito costuma usar-se o termo "percurso", dependendo o seu significado do contexto.

Pela associação aos elementos de um grafo de determinados conjuntos de atributos, tem-se uma rede:

**Definição:** Uma rede  $N = (V, E, C, \dots)$  é constituída por um grafo  $G = (V, E)$ , cujos arcos e nós se associam parâmetros eventualmente de natureza diferente.

Por exemplo aos arcos  $\{i, j\}$  podem estar associados os respectivos comprimentos, ou seja,  $C = \{c_{ij}\}$  é o conjunto de comprimentos dos arcos em que  $c_{ij}$  é o comprimento do arco  $\{v_i, v_j\}$  que liga o nó  $v_i$  ao nó  $v_j$ . É costume, neste caso, considerar-se o comprimento de um caminho como sendo a soma dos comprimentos dos arcos do caminho e não como o seu número de nós, como é usual em certos contextos matemáticos da Teoria de Grafos.

### 2.2.2 Modelos planares, em rede e de localização discreta

Esta classificação baseia-se na forma como a procura e as localizações dos equipamentos estão espacialmente representadas e distribuídas. Num modelo planar de localização, tanto a procura como os equipamentos encontram-se em pontos de um plano.

Num modelo em rede tanto a procura como os equipamentos encontram-se sobre um grafo. Nestes modelos, normalmente a procura concentra-se nos nós da rede. Casos existem porém, em que se considera a procura como gerada nos arcos. Um caso particular é a estrutura em árvore<sup>3</sup>. É o caso de algumas redes de infra-estruturas urbanas tais como algumas redes de abastecimento de águas e as redes de saneamento básico. Nos modelos de localização discreta tanto a procura como a oferta consideram-se como distribuídas pelo grafo de forma discreta (e não contínua).

### 2.2.3 Caracterização de modelos quanto à métrica utilizada

Num modelo de localização é importante a definição da forma como as distâncias são medidas, ou seja a definição da métrica utilizada. Nos modelos de localização em rede, é frequente utilizar-se o comprimento do caminho mais curto como distância entre um par de nós. É o que se faz no estudo apresentado no capítulo IV.

Outras métricas poderão ser pertinentes. Considerando os pontos  $x = (x_1, \dots, x_n)$  e  $y = (y_1, \dots, y_n)$ , temos:

- A Métrica de Manhattan ou  $L_1$ ,  $\left( d_{L_1}(x, y) = \sum_i |y_i - x_i| \right)$ , em que se consideram os pontos como situados no contexto de um retículo, sendo esta distância medida segundo as arestas desse retículo. É muito usada como aproximação de distância em redes de viárias urbanas particulares como as das cidades dos E.U.A.;
- A Métrica Euclidiana, ou  $L_2$ ,  $\left( d_{L_2}(x, y) = \sqrt{\sum_i (y_i - x_i)^2} \right)$ , correspondente ao comprimento do segmento de recta entre dois pontos do espaço (euclidiano);
- A métrica de Chebyshev, ou  $L_\infty$ ,  $\left( d_{L_\infty}(x, y) = \max_i |y_i - x_i| \right)$ , a maior das distâncias entre as projecções dos pontos nos eixos coordenados.

---

<sup>3</sup> Uma **árvore** é um grafo conexo, mas sem circuitos.

#### **2.2.4 Caracterização quanto ao número de equipamentos**

Uma outra forma de caracterizar os problemas de localização serve-se do número de equipamentos a serem localizados. Em determinados problemas, por exemplo problemas de *p-mediana*, problemas de *p-centro* e problemas de cobertura máxima, o número de equipamentos é especificado de forma explícita, ou seja é um parâmetro (ou dado, "input") do problema, contrariamente a outros modelos, como problemas de cobertura e problemas de localização de carga fixa, onde o número de equipamentos está implícito, ou seja é uma sua variável, sendo um dos seus resultados ("output").

Nos problemas com um número fixo de equipamentos, há que distinguir os problemas de localização de um único equipamento dos problemas de localização de múltiplos equipamentos. Como exemplos poderão referir-se a localização numa cidade de um centro comercial ou de vários centros comerciais na mesma cidade e a localização de um ou de vários ecopontos para deposição de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), como é o caso do presente estudo.

#### **2.2.5 Modelos de localização estáticos e dinâmicos**

Além da dimensão espacial já referida anteriormente, pode ser pertinente a consideração da sua dimensão temporal. Nos modelos estáticos os dados de entrada são considerados fixos no tempo ao contrário dos modelos dinâmicos em que a sua variação no tempo é também dado do problema.

#### **2.2.6 Modelos determinísticos e estocásticos**

Aos dados de um modelo podem estar associadas distribuições probabilísticas. É o caso de situações de incerteza quanto aos dados ou situações com envolventes de risco, por exemplo risco de incêndio (Alçada *et al.*, 2008). Portanto nos modelos estocásticos os (ou alguns) dos parâmetros e variáveis encontram-se associados a distribuições de probabilidade. Se forem dinâmicos poderá ter-se associações a processos estocásticos.

### **2.2.7 Caracterização quanto ao número de serviços**

Nas classificações até agora apresentadas, é assumido estar a lidar-se com serviços de um mesmo tipo, o mesmo acontecendo à procura. É o que se passa na maioria dos modelos de localização. Muitas vezes, porém, torna-se importante distinguir entre vários produtos ou serviços prestados pelos equipamentos. Como exemplo refere-se a distinção entre chamadas de emergência críticas (prioritárias) e não críticas, em certos modelos de localização de serviços de emergência.

### **2.2.8 Modelos monobjectivo e modelos multiobjectivo**

Nem sempre o aspecto (objectivo) a otimizar num modelo é único. Casos existem em que há que estabelecer compromissos entre múltiplos objectivos geralmente em conflito recíproco. Neste caso temos modelos multiobjectivo os quais irão merecer uma maior atenção na secção 2 do capítulo IV.

### **2.2.9 Modelos do sector público e do sector privado**

As instituições de administração local e central necessitam de tomar decisões sobre a localização de vários e distintos equipamentos necessários à vivência quotidiana das populações. Refira-se a localização de um hospital, um quartel de bombeiros, um aterro sanitário, uma escola ou até um ecoponto para deposição separativa de resíduos sólidos urbanos, problema tratado no presente estudo. Estes equipamentos deverão ser localizados, para que toda a população seja servida (coberta). Também o sector privado se depara frequentemente com decisões de localização, por exemplo o caso da selecção de locais para instalação de unidades industriais, locais que estimulem a produção e possibilitem um fácil escoamento dos seus produtos para os centros de distribuição. Localizações inapropriadas implicam o aumento de custos bem como a diminuição do nível de competitividade. Não restam dúvidas de que o sucesso ou o insucesso dos equipamentos a localizar, quer pelo sector público, quer pelo sector privado, dependem de forma crucial da sua localização. Um aspecto relevante a referir consiste no binómio custo-benefício, normalmente medido em termos de unidades monetárias, principalmente quando se trata de problemas do sector privado. Já nos problemas do sector público, apesar do relevo a ser dado aos aspectos monetários do binómio custo-benefício, podem tornar-se de

primordial relevância nesse binómio aspectos nem sempre facilmente convertíveis em unidades monetárias, como é o caso de aspectos de natureza ambiental ou de saúde pública. Refira-se o exemplo da localização de serviços de emergência e o valor traduzido em vidas salvas como resultado da diminuição dos tempos de percurso.

#### **2.2.10 Modelos de Localização de equipamentos desejáveis e indesejáveis e semi indesejáveis**

Na maior parte dos problemas de localização interessa localizar equipamentos desejáveis. Os equipamentos desejáveis caracterizam-se por prestarem serviços que as pessoas desejam o mais próximo possível das suas habitações. Como exemplos temos ambulâncias, quartéis de bombeiros, escolas e hospitais. Subjacentes a este tipo de equipamentos estão objectivos de natureza atractiva, "*pull-objectives*", isto é, objectivos que estimulam a atracção do equipamento pela procura. Uma outra categoria de serviços, indesejados ou obnóxios, caracterizam-se por terem subjacentes objectivos de repulsão ou de repulsa, "*push-objectives*". Trata-se de objectivos que estão relacionados com equipamentos que a população (a procura) deseja o mais longe possível das suas habitações. A localização de equipamentos indesejáveis ou obnóxios é um assunto de interesse e estudo crescentes desde que as questões relacionadas com o ambiente se tornaram de primeiro plano nas sociedades industriais, (Carrizosa e Plastria, 1999), (Eiselt e Laport, 1995), (Erkut, e Neuman, 1989). Exemplos deste tipo de equipamentos são os aterros sanitários, centrais de incineração, centros de recuperação de tóxico-dependentes, entre outros.

Como consequência do nível massivo de industrialização, estes serviços têm vindo a constituir um risco real para os seres vivos situados nas proximidades (Cappanera e Gallo, 2004).

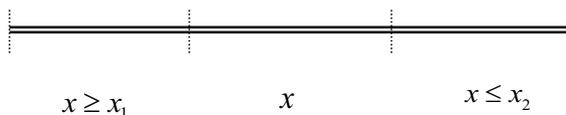
Quando num modelo existem simultaneamente *push-objectives* e *pull-objectives* relativos ao mesmo serviço, estamos perante serviços do tipo semi-obnóxios ou semi-indesejáveis. Trata-se assim de serviços que a procura não quer demasiado perto das suas portas mas também não os quer demasiado afastados. É o caso da localização numa cidade dos serviços de combate a incêndios, centros de reabilitação, centros comerciais, entre outros. Estes equipamentos deverão estar localizados perto das áreas residenciais a servir, embora não demasiadamente perto, de forma a prevenir efeitos não desejados, como seja a poluição sonora, a congestão de tráfego, o crime, os assaltos, bem como outros distúrbios para os residentes nessas áreas urbanas, (Yoshitaka e Akio, 1986), (Himeno, *et al*, 2004).

### 2.3 Localização de Contentores de Resíduos Sólidos Urbanos

A localização de contentores de RSU é um caso particular de Localização de serviços semi-obnóxios apresentados na secção 2.2.10.

Uma das abordagens à natureza semi obnóxia deste tipo de equipamentos usa uma função, “grau de satisfação”,  $S(x)$ , indicadora do grau de satisfação (ou agrado) dos utentes em função da distância,  $x$ , a que se encontram do respectivo ecoponto, (Zhou *et al*, 2005). Esta abordagem pode adaptar-se à localização de ecopontos na aplicação desenvolvida neste estudo, descrita no capítulo IV.

Seja uma população com um número suficientemente grande (supostamente infinito) de indivíduos, a cada dos quais se pergunta, em que intervalo de distâncias  $[x_1, x_2]$  deseja ver o seu ecoponto. Após a consideração de frequências relativas, obtém-se uma função,  $f(x_1, x_2)$ , densidade de aceitação para a resposta  $[x_1, x_2]$ .



**Figura 2.1: Intervalo de aceitação**

O grau de aceitação dos residentes para a distância  $x$ ,  $S(x)$ , surge agora como sendo a fracção de utentes cujos intervalos incluem a distância  $x$ , ou seja, os intervalos  $[x_1, x_2]$ , tais que  $x \geq x_1$  e  $x \leq x_2$  :

$$S(x) = \int_x^\infty \int_0^x f(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad [2.1]$$

Em (Zhou *et al*, 2005), não só se propõe uma expressão para  $f(x_1, x_2)$ , como se apresenta uma expressão aproximada para  $S(x)$ , obtida por ajustamento (“Curve Fitting”).

Trata-se de uma função com valores muito pequenos junto à origem (no intervalo  $[0,10m]$ ), crescente até um máximo num ponto na ordem de algumas dezenas de metros, após o qual se esvai tornando-se praticamente nula acima dos 100m.

Apesar da estrutura de dados do modelo utilizado neste estudo estar preparada para o uso de funções deste tipo, não foi esta a abordagem à natureza semi obnóxica dos serviços do modelo deste estudo, porque a estrutura da oferta é diferente da de (Zhou *et al*, 2005). No presente estudo a procura tem uma estrutura heterogénea, visto haver que tomar em consideração a presença de estabelecimentos não residenciais (além do excessivo peso dos escalões etários extremos na população – jovens e idosos).

Optou-se antes pela consideração de dois objectivos, por um lado a minimização do número de pessoas situadas a até 10 metros do ecoponto mais próximo, e por outro a minimização do número de fracções (residenciais ou não) situados a mais de 100 metros do respectivo ecoponto.

### **3. Alguns Problemas de Localização**

#### **3.1 Problemas de Cobertura**

Neste tipo de problemas trata-se de localizar numa determinada região um certo conjunto de equipamentos de forma a que toda a procura seja servida, ou seja que o conjunto de equipamentos cubra toda a região, mas de forma a que todo o elemento da procura a ser servida não esteja a uma distância considerada exagerada do respectivo equipamento. A ideia subjacente aos problemas de cobertura é a de possibilitarem a localização dos equipamentos necessários para cobrir toda a procura, mas de forma, relativamente às distâncias, satisfatória. Um equipamento é considerado inadequado se estiver localizado para além de uma certa distância (fixa – parâmetro do problema) dos utentes (procura) (Daskin, 1995).

No presente estudo foi considerada uma distância máxima de 200 metros.

Apresenta-se seguidamente uma formalização para este tipo de problemas, (Daskin, 1995).

#### ***Parâmetros***

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{se o local candidato } j \text{ pode cobrir a procura do nó } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$f_j$  = custo de localizar um serviço no local candidato  $j$

### **Variáveis de Decisão**

$$X_j = \begin{cases} 1, & \text{se localizarmos no local candidato } j \\ 0, & \text{no caso contrário} \end{cases}$$

$$\text{Min } \sum_j f_j X_j \quad [2.2]$$

s. a.:

$$\sum_j a_{ij} X_j \geq 1, \quad \forall i \quad [2.3]$$

$$X_j = 0, 1 \quad \forall j \quad [2.4]$$

Neste modelo a função objectivo [2.2] minimiza o custo total dos serviços localizados.

As expressões [2.3] e [2.4], conhecidas por "restrições", correspondem à modelação propriamente dita da situação real de que se debruça o problema, consistindo assim numa sequência de condições a que as variáveis de decisão neste caso ( $X_j$ ) se encontram sujeitas.

Geralmente estas condições resultam de pressupostos simplificativos sobre a realidade.

A parte esquerda de cada restrição do primeiro conjunto de restrições, [2.3] indica o número de serviços que poderão servir um nó. O segundo conjunto de restrições, restrições de integridade, [2.4] indica que cada local candidato não tem possibilidades intermédias entre o adequado (1) e o inadequado (0).

### **3.2 Problemas Centrais ou Problemas p-Centro**

Este tipo problemas consistem em, dados  $n$  pontos de procura distribuídos no espaço, localizar  $p$  serviços de forma a que toda a procura seja servida e de forma a minimizar a maior (máxima) das distâncias entre os pontos de procura e os respectivos serviços.

Estes modelos são conhecidos como Problemas do  $p$ -Centro (PPC) ou Problemas Min-max (minimizar o máximo).

É importante neste tipo de problemas distinguir entre aqueles que permitem localizações em qualquer parte da rede (nos nós e nos arcos) e aqueles que permitem que as localizações se façam apenas nos nós da rede. Os primeiros designam-se de "problemas do centro absoluto" e os segundos denominam-se "problemas do centro no vértice". Nestes últimos pode, inicialmente, eleger-se alguns nós como nós adequados à colocação dos serviços. Esses nós chamam-se nós candidatos. Desse conjunto de candidatos sairão as  $p$  localizações onde efectivamente serão colocados os equipamentos. Dizemos que um local candidato foi aberto se for eleito para a colocação de um serviço. Caso contrário diz-se que se mantém fechado.

Apresenta-se seguidamente um modelo de problema do  $p$ -centro vértice (Daskin, 1995).

Sejam:

$d_{i,j}$  = Distância do nó procura  $i$  ao local candidato  $j$

$h_i$  = Procura do nó  $i$

$p$  = número de equipamentos ou serviços a serem localizados

### **Variáveis de decisão**

$X_j = \begin{cases} 1, & \text{se o local candidato } j \text{ for aberto} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

$Y_{i,j}$  = Fracção (proporção) de procura no nó  $i$  que é servida pelo serviço do nó  $j$

$W$  = Distância máxima entre um nó procura e o serviço mais próximo

$Min W$  [2.5]

s. a.:

$\sum_j Y_{i,j} = 1 \quad \forall i$  [2.6]

$$\sum_j X_j = p \quad \forall_i \quad [2.7]$$

$$Y_{i,j} \leq X_j \quad \forall_{i,j} \quad [2.8]$$

$$W \geq \sum_j d_{ij} Y_{ij} \quad \forall_i \quad [2.9]$$

$$X_j = 0,1 \quad \forall_j \quad [2.10]$$

$$Y_{ij} \geq 0 \quad \forall_{i,j} \quad [2.11]$$

As restrições [2.6] e [2.8] garantem que toda a procura é servida, a restrição [2.7] garante que são escolhidos  $p$  e somente  $p$  locais candidatos, a restrição [2.9] torna  $W$  na máxima distância entre serviços e clientes, máxima distância essa que é o objectivo a minimizar.

### 3.3 Problemas de $p$ -Mediana

O Problema da  $p$ -Mediana (PPM) é um dos principais problemas clássicos da Localização. Aliás, o problema atrás referido como inaugurador da Localização como disciplina autónoma, "Central Facilities Location", (ReVelle e Swain, 1970), é basicamente um problema de  $p$ -mediana.

Trata o PPM de, dado um certo conjunto de pontos de procura, localizar um número  $p$  de equipamentos de serviço (normalmente do mesmo tipo) de forma a minimizar a média das distâncias cliente - serviço atribuído. Designam-se esses pontos por pontos "mediana".

Os Problemas mini soma tiveram origem no século XVII, quando Fermat colocou a seguinte questão: "Dado um triângulo (três pontos no plano), pretende-se encontrar o ponto mediana no plano, tal que a soma das distâncias de cada ponto à mediana é minimizada. Já no início do século XX, Alfred Weber apresentou o mesmo problema adicionando pesos em cada um dos três pontos, de forma a simular a procura. Mais tarde, foi generalizado o Problema de Weber na procura da mediana para um número de pontos no plano superior a três, e para múltiplos serviços, ou seja para o caso de  $p > 1$  medianas entre um determinado número de pontos no plano. Por conseguinte. No início da década de sessenta do século XX, Hakimi desenvolveu problemas similares para encontrar medianas numa rede ou num grafo (Hakimi, 1965).

Em relação ao problema em rede, Hakimi definiu mediana absoluta como sendo o ponto no grafo que minimiza a soma das distâncias pesadas entre esse ponto e os vértices do grafo definidor da rede. O mesmo autor, generaliza a procura de  $p$  medianas absolutas num grafo, de forma a minimizar a soma das distâncias pesadas, tendo sido permitido que estes pontos se localizassem em qualquer parte ao longo dos arcos do grafo, verificando-se que, apesar de nem todas as soluções óptimas para o problema estarem localizadas sobre os vértices, Hakimi mostrou que há sempre um grupo de  $p$  vértices designados de  $p$ -medianas que minimizam o objectivo, encontrando desta forma uma representação discreta para um problema contínuo, restringindo a pesquisa aos vértices.

Apresenta-se aqui um modelo deste tipo, que visa localizar  $p$  serviços considerando conjunto pré definido de locais candidatos para esses serviços (Daskin, 1995).

### **Parâmetros**

$h_i$  = A procura do nó  $i$

$d_{i,j}$  = Distância entre a procura do nó  $i$  e o local candidato  $j$

$p$  = Número de serviços a localizar

### **Variáveis de decisão**

$X_j = \begin{cases} 1, & \text{se o local candidato } j \text{ for aberto} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

$Y_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{se a procura do nó } i \text{ é servida por um serviço do nó } j \\ 0, & \text{no caso contrário} \end{cases}$

$$\text{Min } \sum_i \sum_j h_i d_{ij} Y_{ij} \quad [2.12]$$

s.a:

$$\sum_j Y_{ij} = 1, \quad \forall_i \quad [2.13]$$

$$\sum_j X_j = p \quad [2.14]$$

$$Y_{ij} \leq X_j, \quad \forall_{i,j} \quad [2.15]$$

$$X_j = 0, 1, \quad \forall_j \quad [2.16]$$

$$Y_{ij} = 0, 1, \quad \forall_{i,j} \quad [2.17]$$

Neste caso a distância média é pesada uma vez que os tamanhos da procura,  $h_i$ , entram como pesos no seu cálculo.

O significado das restrições é similar ao já apresentado no caso do  $p$ -centro. O que difere neste modelo é o objectivo a minimizar.

# Capítulo III - Os Sistemas de Informação Geográfica no Apoio à Decisão

O verdadeiro valor dos Sistemas de Informação Geográfica consiste na sua capacidade de analisar espacialmente os dados, usando técnicas de análise espacial.

Goodchild M. F., 1988

---

## 1. Introdução

Desde tempos remotos que o ser humano necessita efectuar a representação (por exemplo através de mapas) dos lugares. As formas de representação evoluíram de forma significativa, não apenas devido à evolução das tecnologias de aquisição de informação para a representação, mas também devido aos progressos nos métodos de representação, por exemplo, Sistemas de Projecção Cartográfica, Esferóides de Referência, Modelação do Geoide, medições obtidas por Sistemas de satélites, onde o Sistema GPS (e muito provavelmente também o Sistema Galileu) ocupa lugar de realce.

As formas de representação evoluíram, desde os esboços gravados nas rochas, passando pela cartografia associada à época dos descobrimentos, até à cartografia actual e seus derivados, por exemplo os modelos digitais de terreno, permitindo inúmeras aplicações em vários domínios, em particular na Engenharia Civil. Os SIG surgem como poderosos sistemas computacionais com capacidade de manipulação, processamento e apresentação de Informação Geográfica (IG). Os SIG tem como suporte IG diversa, como cartas ou mapas, fotografias aéreas, imagens de satélite, ou modelos digitais de terreno. Porém

transcendem-na largamente por possuírem capacidade de execução de múltiplas aplicações com vista à resolução de problemas reais que possam ocorrer sobre o espaço físico terrestre (ruas, vilas, cidades, regiões, países ou mesmo continentes), ou seja sobre o espaço a que a IG se refere.

Os estudos desenvolvidos nas últimas décadas são testemunho de que os SIG constituem, cada vez mais, uma imprescindível ferramenta em múltiplas aplicações ao nível da organização, gestão, manipulação e análise de IG, no seio de uma sociedade cada vez mais complexa, mas exigindo respostas mais rápidas e eficazes, contribuindo de forma significativa para o seu rápido desenvolvimento.

Os SIG são especialmente úteis na gestão municipal, participando na resolução de problemas urbanos tais como a recolha de resíduos sólidos, o abastecimento de água, o saneamento básico, a gestão de tráfego ou a localização de equipamentos.

No entanto, os SIG poderão também ser utilizados para a resolução de outro tipo de problemas, por exemplo problemas ambientais causados por indústrias poluentes, ou problemas de incidência de criminalidade num determinado estado ou região. A Informação Geográfica recolhida para inserir num SIG, é organizada, manipulada, visualizada e analisada, de forma a produzir respostas rápidas, concretas e eficientes, satisfazendo os agentes de decisão e as populações.

Neste capítulo, pretende-se, numa primeira fase, fazer referência a determinados conceitos e princípios gerais relativos aos SIG. Abordar-se-ão, ainda que de forma sucinta, o seu conceito e a sua evolução. De seguida, faz-se uma breve apresentação de alguns Sistemas de Informação (SI): os Sistemas de Gestão de Base de Dados (SGBD), os Sistemas de Apoio à Decisão (SAD), componentes funcionais dos SIG. Seguidamente abordar-se-á a importância dos SIG no Apoio à Decisão.

## **2. Sistemas de Informação**

Antes de avançarmos propriamente para o conceito de SIG, importa mencionar um outro tipo de sistemas, os Sistemas de Informação dos quais os SIG são considerados como um caso, (Maguire. 1991).

Os SI são sistemas computacionais capazes de integrar dados originários de várias fontes e de organizá-los e disponibilizá-los de forma pertinente à tomada de decisão (Almeida, 1997). (Maguire, 1991) identifica-os como sendo sistemas de processamento de transacções<sup>4</sup>, onde a ênfase é atribuída ao registo e manipulação de dados. Em (Mendes, 1995), define-se SI de forma mais geral, instrumentos de apoio à decisão que compreendem, por um lado, base de dados e, por outro, os procedimentos e técnicas necessárias à sua alimentação, restituição, exploração e difusão dos dados e à sua actualização sistemática.

### **3. Conceito de SIG**

No passado recente tem-se assistido a um debate relativo ao conceito de Sistemas de Informação Geográfica. Várias são as razões que justificaram tal discussão. Uma resulta do facto de existirem distintas formas de definir e classificar os objectos com que lidam os SIG. Outra razão prende-se com a grande diversidade nos domínios de aplicação (Maguire, 1991). Não surpreende pois, que ao longo das últimas décadas tenham proliferado aplicações distintas com múltiplos e variados métodos, nem sempre compatíveis.

Várias têm sido as propostas para a definição dos SIG, como a apresentada em (Burrough e MacDonnell, 2000), onde SIG consiste num conjunto de ferramentas para coleccionar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados espaciais relativos ao mundo real, de forma a atingir objectivos específicos. Basicamente, as propostas de definição seguem duas tendências: uma que aponta para uma definição estritamente tecnológica e outra que seguindo um ponto de vista mais abrangente, realça a sua natureza organizacional institucional (Maguire, 1991).

Os dados geográficos (espaciais) representam fenómenos reais referenciáveis em termos de um sistema de coordenadas. Para além da sua referenciabilidade essas entidades possuem outros atributos como cor, custo, comprimento, ou estado de degradação, bem como interrelacionamento espacial. Esta última característica é a que se designa por “topologia” potencialidade deste tipo de sistemas que permite descrever certas

---

3: O termo “transacção” é aqui entendido como uma alteração na base de dados, mas de forma a manter a integridade dos mesmos perante certos acontecimentos imprevistos.

propriedades espaciais, como, a conectividade entre linhas na definição de uma rede física, por exemplo a rede de ruas de uma determinada cidade (Burrough e MacDonnell, 2000).

O objectivo principal na utilização de estruturas topológicas é o aperfeiçoamento do desempenho na análise espacial dos SIG (Herring, 1987).

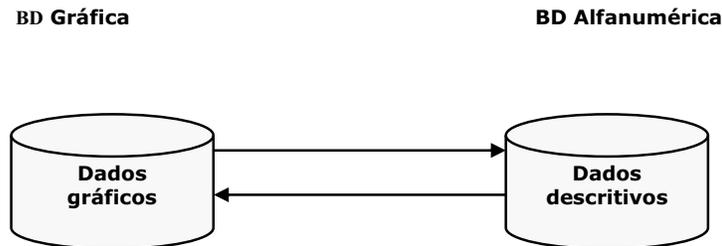
Existem outras definições de SIG que realçam tanto o conceito de base de dados (BD) como os aspectos organizacionais. A definição de base de dados incide na forma de organização dos dados para a sua manipulação espacial, tendo em conta a sua localização, atributos e topologia. O conceito organizacional evidencia as regras institucionais para o manuseamento da informação espacial, em detrimento das ferramentas necessárias.

Outros autores como (Maguire e Raper, 1990) e (Maguire e Dangermont, 1991), são da opinião de que a classificação dos SIG baseada na funcionalidade se tornou bastante popular, enquanto outro grupo de autores como (Clarke, 1986), tentaram desenvolver esquemas baseados em várias características, genealogia, custo, dimensão, plataforma, área de aplicação e modelo de dados.

Verifica-se que, apesar das várias definições realçarem diferentes características dos SIG, existe consenso em relação ao carácter espacial dos dados e à possibilidade da sua visualização, em particular a grande vantagem residente no facto de possuírem uma componente gráfica (visual), o que permite ao operador, perante qualquer tipo de manipulação de informação que venha a ser executada, poder quase em simultâneo, visualizar de imediato os respectivos resultados e simular diferentes e possíveis cenários.

Não sendo intenção apresentar aqui uma definição formal, mas observando as opiniões dos autores supracitados e as definições por eles apresentadas, considera-se aqui um SIG como uma tecnologia constituída por duas ferramentas essenciais: uma base de dados gráfica ou cartográfica, onde os dados armazenados poderão ser mapas, fotografias, imagens de satélite; uma base de dados alfanumérica constituída pelos atributos (características) associados aos dados gráficos. Estas duas bases de dados estão em constante interacção o que possibilita que qualquer alteração realizada na base de dados alfanumérica implicará quase em simultâneo a correspondente alteração na base de dados gráfica e reciprocamente. Está aqui evidenciada a ideia de duas componentes que interagem de forma constante. Uma contendo a componente gráfica (mapas e/ou

fotografias aéreas e/ou terrestres), a outra integrando a componente alfanumérica (dados descritivos ou atributos).



**Figura 3.1: Esquema da interação entre a BD gráfica e a BD alfanumérica**

#### **4. "Origem" e evolução dos SIG**

Uma História dos SIG vai pois depender em larga medida, da definição adoptada para o conceito de SIG (Coppock e Rhind, 1991).

É conhecida a divergência de opinião relativamente à origem dos SIG. Alguns autores assinalam o aparecimento dos SIG na década de sessenta do século XX, reconhecendo o desenvolvimento significativo neste domínio em diversas partes do mundo, apesar de pouco publicado sob a forma de artigos ou relatórios.

Várias foram as razões que motivaram o aparecimento dos SIG. De realçar o surgimento nos meios académicos de uma curiosidade e ao mesmo tempo um desafio para a possibilidade de encontrar novas fontes de dados, bem como novas técnicas para a sua aquisição de forma a aumentar a eficiência e velocidade nas operações sobre dados espacialmente referenciados.

Não existem dúvidas porém de ter sido na América do Norte, que ocorreram os desenvolvimentos mais significativos no domínio dos SIG, das suas aplicações e das tecnologias com ele relacionadas. Em 1964, surgiu a possibilidade da utilização de computadores designados de "mainframe", quando a empresa IBM introduziu os computadores das séries 360/365, com velocidades de processamento e capacidade de memória, respectivamente 400 e 32 vezes superiores às do seu antecessor o IBM 1410, (Tomlinson, 1985).

Em (Tomlinson, 1985), estima-se existirem, no início da década de oitenta, provavelmente mais de 1000 sistemas a funcionar na América do Norte.

Os desenvolvimentos prosseguiram, embora em menor escala, na Europa e Austrália, apesar de, durante a década de setenta e início da década de oitenta as principais tentativas para o desenvolvimento e utilização de Cartografia Assistida por Computador terem sido feitos por vários países como a Suécia, Noruega, Dinamarca, França, Holanda, Reino Unido, Alemanha Ocidental e Austrália. Foram desenvolvidos várias aplicações cartográficas, bem como centenas de programas e sistemas computacionais, essencialmente por agências governamentais, institutos e universidades. Apesar da motivação para enveredar por estas tecnologias, estas não se traduziram numa economia de custos como seria de esperar, isto porque a aquisição e o desenvolvimento de novas ferramentas, acrescido do hardware necessário, tornava o projecto bastante dispendioso, implicando alguma relutância por parte das instituições e organizações na introdução desta tecnologia.

Na década de noventa assistiu-se a vários e importantes desenvolvimentos técnicos e organizacionais que impulsionaram fortemente os SIG. De salientar, o significativo apoio dado por novas e mais evoluídas técnicas de aquisição de dados, particularmente através dos receptores GPS que atingiram melhor precisão, acompanhada de alguma redução no preço. A evolução das técnicas de aquisição e exploração de imagens de satélite obtidas a partir de sensores, dos quais o Landsat e Spot são os exemplos mais evidentes, também evoluíram de forma significativa, bem como instrumentos topográficos tais como estações totais robotizadas, níveis a laser, entre outros.

Actualmente, verifica-se uma tendência para que as aplicações em SIG sejam integradas com tecnologia baseadas na Internet, (Longley *et al*, 2000).

O resultado de mais de vinte anos de desenvolvimentos técnicos permitiu que os SIG se tornassem num fenómeno mundial (Burrough e McDonnell, 2000).

## **5. Os SIG e outros Sistemas de Informação**

### **5.1 Os Sistemas de Gestão de Bases de Dados (SGBD)**

Antes de identificar este tipo de sistemas importa introduzir algumas noções relativas ao conceito de bases de dados.

Sob um ponto de vista meramente físico, uma base de dados é um conjunto organizado de dados residentes em um ou mais ficheiros. Caso o suporte de armazenamento destes ficheiros seja um sistema informático, eles podem encontrar-se distribuídos por directorias, podendo estas estar difundidas por vários nós de uma rede de computadores (Alçada, 2003).

Segundo (Alçada, 2003), para definir justamente uma base de dados, teremos de incluir determinadas características chave inerentes ao conceito.

- Os dados são representados de uma forma estruturada e compactada;
- Os dados podem ser acedidos e actualizados de uma forma rápida;
- É minimizada a inconsistência e redundância da informação contida nos dados;
- É minimizado o risco de perda ou alteração inconveniente de informação.

As bases de dados necessitam de ser supervisionadas nos diversos aspectos do seu funcionamento, em situações em que ocorra qualquer percalço deverá garantir-se de forma rápida o restabelecimento da normalidade. Esta supervisão é da responsabilidade de uma pessoa individual (ou grupo de pessoas), o administrador sendo este o responsável pelo sistema global do SGBD e pela segurança dos próprios dados.

A ideia associada a um SGBD é traduzida por um conjunto constituído pela base de dados e pelas aplicações que estabelecem a interface entre os dados e o utilizador. As aplicações poderão estar distribuídas por nós de uma rede de computadores podendo dar uma visão própria dos dados a cada utilizador.

## 5.2 Sistemas de Apoio à Decisão (SAD)

Os Sistemas de Apoio à Decisão são ferramentas eventualmente integradas em SGBD que, recorrem a modelos analíticos, visualização gráfica, relatórios, tabelas e conhecimento experiente dos decisores. Os Sistemas de Apoio à Decisão Espacial (SADE) são considerados como próximos dos Sistemas de Apoio à Decisão (SAD), desenvolvidos nas ciências da Gestão e da Investigação Operacional com o intuito de resolver problemas de natureza espacial.

(Geoffrion, 1983), utiliza características para definir SAD que podem também ser utilizadas para definir os SADE. No entanto, devido à natureza complexa dos problemas espaciais, estes fornecem funções e capacidades adicionais para:

- Fornecer mecanismos de entrada de dados espaciais;
- Permitir a representação de relações e estruturas que são comuns aos dados espaciais;
- Incluir técnicas analíticas únicas para a análise espacial e análise geográfica (incluindo a análise estatística);
- Fornecer saídas em vários formatos, tais como mapas, gráficos, entre outros.

Observando as características dos SADE, verifica-se que este tipo de sistemas facilita o processo de pesquisa da decisão que pode ser caracterizado como interativo, integrativo e participativo. Considera-se interativo, pois o conjunto de soluções alternativas são geradas a partir da forma como o decisor as avalia. É integrativo, pois a partir de soluções que vão sendo produzidas, poderão introduzir-se pequenas variações nos modelos para refinar e simular novas e diferentes soluções. A vantagem da participação é a integração, que se traduz em julgamentos/apreciações de valores que materialmente afectam a solução final produzida (Denshaw e Armstrong, 1987).

A base de dados integra uma variedade de dados espaciais e não espaciais, o que facilita a utilização de técnicas de modelação analítica e estatística. Possui uma interface gráfica, que possibilita aos decisores a visualização de informação, incluindo o resultado de análises sob várias formas.

Por conseguinte, estabelecendo uma comparação entre os SADE e os SIG, conclui-se que ambos os sistemas se adaptam ao estilo do decisor na resolução do problema e, sendo facilmente modificados, ganham novas capacidades (Keen, 1980).

## **6. A Informação do SIG**

### **6.1. Dados alfanuméricos**

Num modelo de dados geográfico a realidade geográfica é representada por uma série de formas geográficas, muitas vezes designadas de entidades ou objectos.

Os objectos espaciais podem ser definidos como um conjunto constituído pelas localizações espaciais e pelas propriedades que caracterizam essas mesmas localizações. No entanto, num contexto mais generalizado um objecto é definido como qualquer entidade de interesse (entidades espaciais, não espaciais e atributos), (Paredes, 1994).

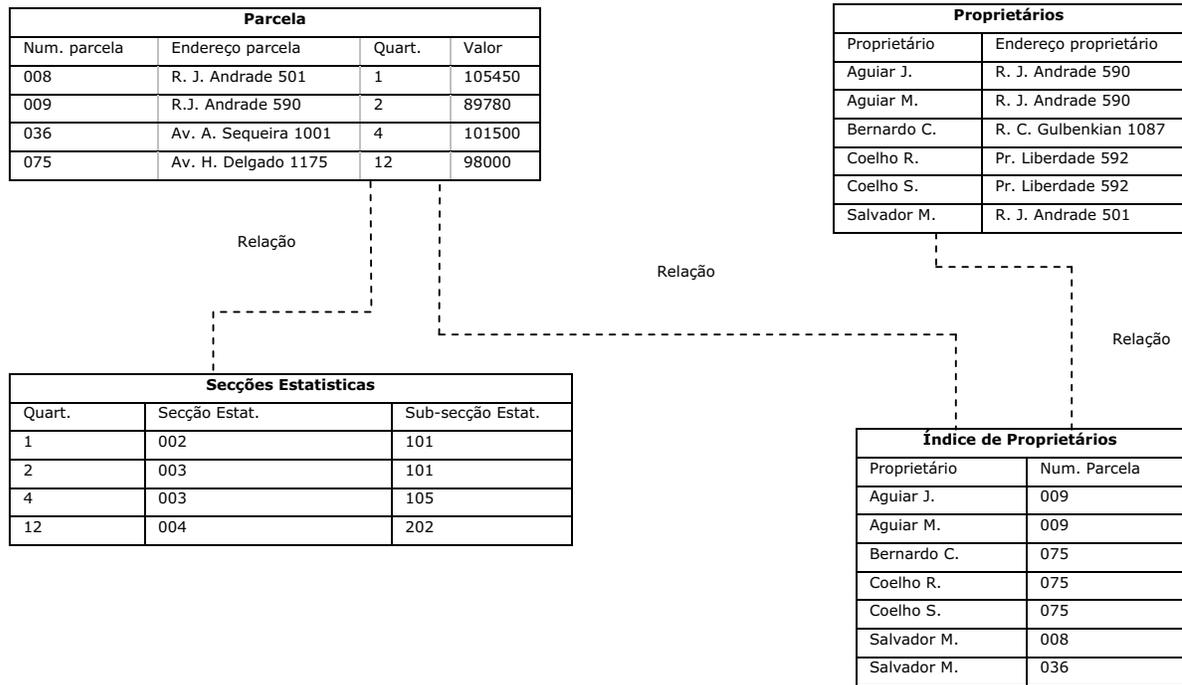
Apesar de existirem vários tipos de estrutura de dados alfanuméricos apenas se irá apresentar a respeitante ao modelo relacional de base de dados.

Uma primeira aproximação ao conceito de sistema relacional foi inicialmente estabelecida por (Codd, 1970, 1979), que define como sendo um meio de descrever os dados com a sua estrutura natural, de forma a assegurar a independência de programas de aplicações escritos pelo utilizador, a partir de formatos de armazenamento detalhados dentro da base de dados.

Os sistemas relacionais são caracterizados pela simplicidade, na qual todos os dados são representados em tabelas (relações) de linhas e colunas. Do ponto de vista da concepção da base de dados, o modelo entidades-relações aproxima-se muito aos sistemas relacionais. Cada conjunto de entidades é representado por uma tabela, enquanto cada linha na tabela representa os dados de uma entidade individual. Cada coluna possui os dados de cada um dos atributos do conjunto de entidades.

No quadro 3.1, é apresentada a estrutura de tipo relacional aplicada a uma base de dados cadastral.

Dimensionamento e Localização de Ecopontos para a Baixa de Coimbra  
com Metodologia Multicritério e Tecnologia SIG



**Quadro 3.1: Estrutura relacional de uma BD cadastral**

Podem sumariar-se algumas vantagens dos sistemas relacionais:

- Metodologia de concepção rigorosa, baseada em fundamentos teóricos;
- Todas as outras estruturas de bases de dados podem ser reduzidas a um conjunto de tabelas relacionais; conseqüentemente são a forma de representação de dados mais geral;
- De fácil uso e implementação, comparada com outros tipos de sistemas;
- Permite que sejam facilmente adicionadas novas tabelas, bem como novas linhas de dados dentro das próprias tabelas;
- Flexibilidade, permitindo a recuperação de dados devido ao mecanismo de combinação relacional e facilidades na linguagem de pesquisa.

## 6.2 Dados gráficos

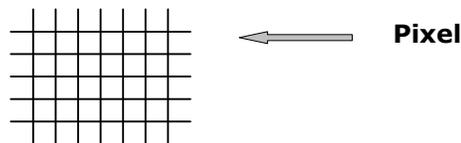
A escolha do modelo de dados é influenciada por alguns factores, como o tipo de software disponível, a natureza da aplicação, a perícia do operador e também precedentes históricos.

Na concepção das bases de dados geográficas são utilizados dois modelos fundamentais de dados geográficos: o modelo de dados vectorial e o modelo de tesselação também designado de modelo de dados raster (Peuquet, 1984).

### 6.2.1 Estrutura Raster

A informação raster baseia-se na divisão do espaço em células, onde cada uma dessas células é o elemento mínimo de imagem, o píxel, estando o valor de cada célula disponível para o utilizador (Peuquet, 1984).

Este conceito pode também ser abordado como um vector onde a cada célula corresponde um atributo do objecto. O conceito pode ainda ser visualizado como uma sobreposição de vectores similares, onde cada um contém valores do atributo para uma determinada propriedade.



**Figura 3.2: Representação esquemática de uma estrutura raster**

Segundo, (Frank e Mark, 1991), um mapa raster poderá definir-se como:

$$\text{mapa} : \text{propriedade} \times i_x \times i_y = \text{valor} \quad [3.18]$$

Onde:

$i_x$ , Representa o índice de cada linha da matriz;

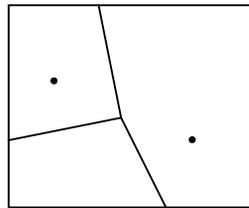
$i_y$ , Representa o índice de cada coluna da matriz

A propriedade pode ser altitude, custo, declive, etc.

Recorrendo a este modelo geométrico de dados, pode construir-se aquilo que se designa por "Álgebra de Mapas", (Tomlin, 1983). As operações definidas sobre esta estrutura, têm como dados de entrada (input) dois mapas que irão produzir um novo mapa (output) de acordo com uma regra específica. O mapa resultante contém exactamente a mesma estrutura de dados espaciais que os mapas de entrada, mas um conteúdo diferente, podendo ainda ser utilizado como entrada para outras operações.

### 6.2.2 Estrutura vectorial

No modelo vectorial, as entidades são representadas a partir das primitivas topológicas: ponto, linha e área. Este modelo vectorial fornece informação (dá instruções) para a construção do desenho das entidades geográficas.



**Figura 3.3: Exemplo de uma estrutura vectorial**

As primitivas topológicas do tipo ponto, linha e área são geograficamente representadas em relação a um sistema de coordenadas cartesianas. Pode dizer-se que os pontos, as linhas e as áreas são representações estáticas de fenómenos físicos em termos de coordenadas bidimensionais  $(X, Y)$  ou tridimensionais  $(X, Y, Z)$ . A entidade geográfica do tipo ponto está definida por um par de coordenadas  $(X, Y)$ , podendo representar, consoante a escala, uma cidade, uma torre ou mesmo, um candeeiro de iluminação urbana. Já as entidades do tipo linha podem ser representadas por dois pares de coordenadas cartesianas  $(X, Y)$  eferentes aos pontos extremos da linha. Como exemplo temos uma estrada nacional, onde a sua representação a uma escala apropriada é uma linha, enquanto a representação de uma rua de uma zona urbana é feita com um polígono (que define a faixa de rodagem) da rua.

## **7. Componentes funcionais de um SIG**

Segundo (Maguire e Dangermond, 1991) as componentes de um SIG compreendem a aquisição, a transferência, a validação e edição, o armazenamento e estruturação, a reestruturação, a generalização, a transformação, o inquérito, a análise e a apresentação.

As primeiras quatro componentes são aquelas a que correspondem aos maiores custos associados ao projecto de SIG. Considerando apenas a fase de aquisição de dados, após um levantamento efectuado (Konecny, 1988), este concluiu que os custos associados a esta fase variavam entre 34% a 84% do custo total do projecto.

(Marble, 1984), referem a existência num SIG de quatro subsistemas nos quais podem ser enquadrados as seguintes componentes funcionais classificadas por (Maguire, e Dangermond, 1991): i) entrada de dados, no qual podem ser enquadrados as funções de aquisição, transferência, validação e edição; ii) armazenamento de dados, onde se podem enquadrar as funções de armazenamento e estruturação, reestruturação, generalização e transformação; iii) manipulação e análise de dados, onde se enquadrarão as funções de inquérito e análise; iv) saída de dados, onde será localizada a função de apresentação dos dados.

Segundo (Burrough e MacDonell, 2000), os SIG integram três importantes componentes, o hardware do computador, o conjunto de aplicações e de módulos de software e o próprio contexto organizacional e de pessoal especializado.

Para além das componentes de hardware, processadores, placas, CD-ROM, discos magnéticos, entres outros, há a considerar também as componentes de software, em particular os procedimentos de controlo e gestão de bases de dados.

Para a conversão de mapas, fotografias aéreas e outros documentos na forma digital, recorre-se a periféricos digitalizadores ou scanners e programas computacionais específicos.

Após a referência a algumas classificações dos SIG ao nível da funcionalidade, defendidas por alguns autores, abordar-se-á de seguida de forma mais detalhada uma classificação baseada nos trabalhos de (Maguire e Dangermont, 1991). Estes autores agrupam as funções do SIG de acordo com a sua afinidade:

- Aquisição;
- Transferência;
- Validação;
- Edição;
- Armazenamento e estruturação;
- Reestruturação;
- Generalização;
- Transformação;
- Inquérito;
- Análise
- Apresentação.

A aquisição dos dados é efectuada de diversas formas, apesar de em diversas situações, já existir informação para o estudo em causa. Por exemplo, cartas, fotografias aéreas, terrestres e de satélite que já existam, podendo haver apenas a necessidade de actualizar esses produtos de IG. Para tal, recorre-se a trabalho de campo para execução de levantamentos topográficos, coberturas aéreas, etc.

Os processos de aquisição de dados podem ser divididos em dois grupos de operações: i) a aquisição de dados primários, cujos exemplos são a fotografia aérea e a imagem de satélite adquirida por sensores da Detecção Remota; ii) aquisição de dados secundários, por exemplo a partir de fontes cartográficas convencionais como cartas e plantas (Jackson e Woodsford, 1991).

Os processos de transferência podem ir desde a utilização de redes de comunicação mais ou menos sofisticadas até a processos "manuais" como o transporte físico dos dispositivos de armazenamento de dados (cartas, mapas, fotografias, etc.).

Os dados obtidos por aquisição ou transferência podem ainda necessitar de uma depuração de erros e inconsistências, processo designado de validação. Todos os bons produtos de software de SIG incorporam rotinas específicas que executam estas operações.

O armazenamento bem como a estruturação dos dados são operações fulcrais no desenvolvimento bases de dados geográficas, em particular a estruturação dos dados reveste-se de extrema importância pois dela depende a eficiência do armazenamento.

Seguidamente, os dados são submetidos a um processo de edição. A edição inclui as operações reestruturação, por exemplo a conversão de estruturas do tipo raster em vectorial e operações de generalização, tais como a agregação e/ou de suavização de linhas e dissolução de fronteiras entre polígonos adjacentes, bem como a substituição de um determinado atributo pelo seu valor médio.

A transformação, inquérito e análise precedem o último processo de um projecto de SIG, que é a visualização.

É esta fase que permite ao utilizador ver as soluções dos problemas estudados, através da geração de diversos mapas temáticos, relatórios, gráficos, entre outros.

## **8. Os SIG no Apoio à Decisão**

Após a caracterização deste tipo de sistemas, importa agora abordar a sua importância no domínio do Apoio à Decisão. Demonstrou-se na secção 3 que uma das características mais importantes na constituição dos SIG são devidas à sua capacidade ao nível da visualização dos dados a serem processados, produzindo posteriormente soluções que também poderão ser visualizadas quer sob a forma gráfica quer tabular. Esta potencialidade dos SIG, permite através da combinação com um SAD desenvolver um de Sistema de Apoio à Decisão Espacial (SADE) já referidos na secção 5.2 deste capítulo. Um outro aspecto importante nos SIG e que é relevante ao nível de qualquer situação em Planeamento é a capacidade de integrar espacialmente informação vinda de diferentes fontes/origens (Peckham, 1997).

No presente estudo foram utilizados diversos dados provenientes de diversas origens, tais como, mapas com informação planimétrica da rede de ruas e edifícios da Baixa de Coimbra, fotografia aérea da zona, tabelas com diversa informação dos edifícios contendo: áreas de implantação, número de residentes, estado de degradação do edifício, número de pisos, dados de resíduos produzidos pelos habitantes e estabelecimentos comerciais (papel, vidro, plástico, resíduos indiferenciados).

A possibilidade de inquirir informação espacialmente referenciada através de uma interface gráfica baseada em mapas fornece aos decisores uma ajuda no tratamento dos problemas. A análise espacial fornece um meio para enriquecer a informação disponível, onde os

decisores poderão gerar/produzir mais parâmetros a partir dos dados referenciados espacialmente.

Actualmente, o diverso software de SIG existente no mercado fornece uma série de ferramentas para a análise espacial, tais como operadores numéricos e booleanos em diferentes níveis temáticos, análise de áreas e análise de redes. Muitas vezes, em determinadas aplicações a desenvolver, torna-se necessário ligar a análise espacial a outros cálculos externos ou modelos de simulação de forma a conseguirem-se obter parâmetros que sustentam a decisão. Um dos mais interessantes desafios colocados perante a tecnologia SIG, é a de permitir aconselhar formas para o uso de ferramentas da análise espacial com vista à geração de parâmetros que possam ser relevantes para as decisões. Outro desafio é o desenvolvimento de novas tipologias de análise espacial apropriados num determinado contexto de decisão (Peckham, 1997).

A ligação dos SIG a métodos formais de apoio à decisão pode produzir poderosas ferramentas para usar na análise de muitos problemas onde a dimensão espacial assume uma primordial importância na análise.

# Capítulo IV - Caso de Estudo: Localização de Ecopontos na Baixa de Coimbra

---

## 1. Definição do caso de estudo

### 1.1 Introdução

Os resíduos produzidos pelas sociedades humanas constituíram desde sempre uma preocupação para essas mesmas sociedades. Ao longo dos tempos verifica-se que os níveis de produção de resíduos aumentaram de forma significativa devido a diversos factores nomeadamente a melhoria das condições de vida que acompanharam os processos de desenvolvimento económico das sociedades, problemas que a crescente urbanização e sedentarização dessas sociedades vieram incrementar. Por outro lado, o desenvolvimento económico e o consequente aumento dos níveis de consumo, assim como um crescimento populacional exponencial<sup>5</sup> ainda mais contribuem para a pertinência desta problemática.

---

<sup>5</sup>As políticas de controlo de natalidade parecem terem baixado significativamente as taxas de crescimento populacional. No entanto, se nenhuma acção adicional for tomada à escala global, em especial nos países subdesenvolvidos, esse crescimento prosseguirá até meados do próximo século ([http://pt.wikipedia.org/wiki/Crescimento\\_populacional](http://pt.wikipedia.org/wiki/Crescimento_populacional)).

Os sistemas de gestão de resíduos pretendem dar resposta a estas questões, compreendendo componentes relativas à deposição, recolha, transporte e tratamento, envolvendo a reciclagem e valorização dos resíduos, por exemplo no sentido da sua transformação em energia.

Trata-se assim de questões de natureza ambiental e sanitária mas com elevado e crescente impacto, não só ao nível político e económico, mas também de carácter cultural que se traduz, por exemplo, na criação de hábitos de deposição de resíduos em locais apropriados, bem como na sua prévia separação, por parte dos cidadãos.

Sendo eficazmente planeadas, as políticas de gestão de resíduos poderão contribuir para a conservação dos recursos naturais, para a protecção da qualidade do ambiente e, desta forma, contribuir efectivamente para o desenvolvimento sustentável (COM, 1996).

A designação de Resíduos Sólidos Urbanos, embora ainda utilizada, tem vindo nos anos recentes a ser substituída pela designação de resíduos diferenciados, perspectivando a ideia de separação associada à valorização e reciclagem com vista a proporcionar um ambiente mais saudável e sustentável.

É neste contexto que se apresenta um estudo para a localização na zona da Baixa da cidade de Coimbra<sup>6</sup> de pontos de recolha de resíduos sólidos urbanos, usualmente designados por ecopontos.

Trata-se de uma análise multiobjectivo que visa o apoio à decisão de localização deste tipo de equipamentos, tendo em vista objectivos como a minimização do custo de implementação, a minimização da distância média a percorrer pelos cidadãos, a minimização do número de pessoas afectadas pela sua excessiva proximidade ou então pelo seu excessivo afastamento.

## **1.2. Enquadramento legislativo**

A integração de Portugal na União Europeia veio ocasionar a transposição da legislação comunitária para a legislação nacional em matéria de resíduos.

---

<sup>6</sup> Esta zona é carinhosamente designada, pelos cidadãos, de "Baixinha"

A Lei 448/85 de 25 de Novembro, revogada pela Lei 310/95 de 20 de Novembro, transpõe as directivas comunitárias 91/159/CEE de 18 de Março e 91/689/CEE de 12 de Dezembro, descreve as regras gerais para a gestão dos resíduos, bem como a responsabilidade dos actores na gestão dos resíduos, estabelecendo ainda o Princípio do Poluidor Pagador (PPP).

O Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU), aprovado em 1997, criado na Lei 239/97, constitui um instrumento de planeamento de referência na área de resíduos sólidos urbanos, definindo as políticas de sustentabilidade para a gestão de RSU no território nacional. O balanço da sua aplicação é claramente positivo, com o encerramento das lixeiras, a criação de sistemas multi-municipais de gestão de resíduos, a construção de infra-estruturas de valorização e eliminação e a criação de sistemas de recolha selectiva multimaterial (Portaria nº 187/ 2007 de 12 de Fevereiro). Com a publicação do Dec\_Lei nº 178/2006, de 5 de Setembro, surge o Plano Estratégico para Resíduos Sólidos Urbanos II (PERSU II) que revê as estratégias definidas no PERSU para o período de 2007 a 2016.

### **1.3. Área de estudo**

A área em estudo insere-se no centro histórico da cidade de Coimbra, possuindo características peculiares, com predominância de edifícios antigos e elevado valor histórico e arqueológico. Muitas das suas ruas pouco mais permitem do que circulação pedonal, em virtude da sua estreiteza. É também uma zona com grande densidade de estabelecimentos comerciais e outros serviços, principalmente nos andares térreos dos edifícios.

A Baixa de Coimbra apresenta características próximas de “arrabalde” da cidade medieval, com uma estrutura viária urbana muito consolidada ao longo de séculos. Actualmente, muitos desses traços ancestrais ainda perduram, em particular o traçado das ruas e diversa toponímia e até mesmo a sua vocação comercial, com pequenas lojas e tabernas paredes-meias com habitação de características populares. De salientar também os vários monumentos históricos de elevado valor patrimonial, como por exemplo a Igreja de Santa Cruz, a Igreja de São Tiago, e a Igreja de São Bartolomeu.

São 15 hectares, onde habitam cerca de 1200 pessoas em algumas das cerca de 500 fracções residenciais (muitas em estado devoluto), e trabalham cerca de 2400 em 1200 fracções não residenciais. Estas últimas dedicam-se essencialmente a um bom número de estabelecimentos comerciais (normalmente vestuário, calçado e restauração) e a actividades de tipo liberal (consultórios médicos e de advocacia). Bastantes são ocupadas

por departamentos administrativos e instituições financeiras. Existe assim um total de aproximadamente 1700 fracções.



**Figura 4.1: Planta da zona em estudo**

Esta zona encontra-se em processo de recuperação, no âmbito de um projecto de renovação urbana e social. Este processo visa desenvolver uma metodologia inovadora para solucionar problemas relacionados com a recuperação e modernização do edificado habitacional, recuperação e modernização dos espaços comerciais, modernização das infra-estruturas, renovação e modernização do espaço e equipamentos públicos, e modernização e qualificação do ambiente urbano. Várias são as instituições envolvidas, nomeadamente a Câmara Municipal de Coimbra, a Sociedade de Renovação Urbana Coimbra Viva e a Universidade de Coimbra, esta última através de um levantamento da realidade existente e desenvolvimento de um Sistema de Gestão Urbana (SIGUrb).

O SIGUrb é um Sistema de Informação e Gestão Urbana que incorpora tecnologia SIG-Web e uma base de dados relacional. A base de dados possui diversa informação referente à área de estudo, nomeadamente atributos dos edifícios (número de fracções por edifício, número de residentes por fracção, números de polícia), toponímia de ruas, praças e largos, bem como fotografias digitais, plantas e alçados. Este sistema foi concebido para auxiliar os planeadores na resolução de diversos problemas relacionados com Planeamento e Gestão Urbana, possui além das capacidades de um Sistema de Informação Geográfica "normal", outras potencialidades desenvolvidas nomeadamente para a integração de modelos formais de apoio à decisão em problemas reais.

## **1.4 Resíduos sólidos urbanos e pontos de recolha (ecopontos)**

### **1.4.1 Tipos de ecopontos e de resíduos**

A recolha e deposição de Resíduos Sólidos Urbanos contribuem para o principal volume de custos envolvido ao nível da gestão de resíduos (Goulart, 2003). Vários são os factores que influenciam a eficiência deste sistema, quer em termos de funcionalidade, quer em termos de custos. De referir, por exemplo, o tipo de resíduo, o tipo de recipiente, o tipo de veículo para recolha, os recursos humanos, as condições locais e os percursos a percorrer na deposição e na recolha.

Para o presente estudo a selecção dos diversos modelos/alternativas de localizações de ecopontos, teve por base um levantamento realizado a empresas que comercializam esse tipo de equipamentos, disponibilizando informação quer das características técnicas dos vários tipos de ecopontos, quer dos custos de implementação e de recolha.

A deposição diferenciada de resíduos pode ser feita recorrendo a conjuntos de recipientes colocados à superfície ou em recipientes colocados em infra-estruturas subterrâneas, cubas em betão cobertas à superfície por uma plataforma, normalmente amovível, de onde emergem as "bocas"<sup>7</sup> para introdução dos resíduos. Os recipientes onde os resíduos são depositados são colocados no interior dessas cubas, sendo que a cada um desses recipientes corresponderá um marco à superfície (figura 4.2).

---

<sup>7</sup> Marcos de deposição

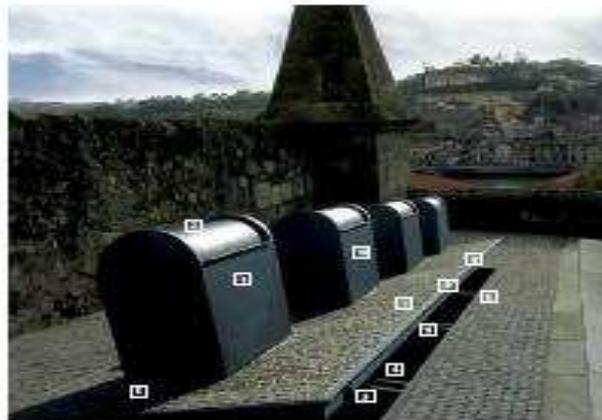


**Figura 4.2: Marcos de deposição de resíduos**

As características da área de estudo, em particular a sua inserção no centro histórico da cidade, levaram a que se elegeisse para este estudo somente modelos com recipientes subterrâneos.

Existem dois tipos fundamentais de acesso aos recipientes:

- a. A plataforma de recolha dispõe de uma dobradiça abrindo em ângulo recto; sendo os depósitos acedidos através de uma grua (figura 4.3).



**Figura 4.3: Sistema de ecopontos com abertura em ângulo recto**

- b. Todo o sistema de depósitos juntamente com a plataforma levanta, na vertical, por meio de um elevador, ficando os depósitos à superfície para acesso ao seu conteúdo (figura 4.4).



**Figura 4.4: Sistema de ecopontos com elevação na vertical**

Dentro do primeiro tipo de acesso apresentado, consideraram-se neste estudo duas marcas: "Citytainer" e "Swingomat". A primeira marca permite apenas 4 recipientes com capacidades de 3000 ou 5000 litros, a segunda permite mais de 4 recipientes com capacidades de 800, 1000, 2000, 3000 e 5000 litros.

No tipo b enquadra-se o sistema "Liftomatic", que permite conjuntos com um máximo de 5 recipientes com capacidades de 800, 1000 e 2000 litros. Este sistema possui a vantagem de utilizar recipientes tradicionais de plástico muito conhecidos que são normalmente usados na recolha de resíduos indiferenciados feitos à superfície, o que, conjuntamente com o método (elevador) de acesso a esses recipientes, não exige dispositivos especiais para a recolha (grua ou mesmo veículo de recolha apropriado). Infelizmente os recipientes têm capacidades relativamente limitadas.

Consideraram-se quatro tipos essenciais de resíduos:

- a. Papel, onde estão incluídos o cartão: jornais, revistas, cartolinas, envelopes, caixas de cartão, entre outros;
- b. Plásticos, onde tradicionalmente se incluem materiais metálicos: copos de plástico, embalagens, sacos, tubos de canalizações em PVC, chapas metálicas, alumínio, sucatas de ferro e cobre, entre outros;
- c. Vidros e afins: copos, garrafas, frascos, entre outros;
- d. Lixos indiferenciados normalmente correspondentes a resíduos de natureza orgânica, como comida.

Assim, os ecopontos deverão ter pelo menos 4 recipientes, um para cada dos tipos de resíduos considerados.

Porém, em virtude da grande densidade de estabelecimentos comerciais existentes na zona, verifica-se um grande desvio no sentido do tipo papel da quantidade de resíduos produzida. Estimou-se aproximadamente 73 000 litros de papel por dia, em contraste com os 21 000 litros de resíduos genéricos indiferenciados, ficando-se o plástico e o vidro pela ordem de alguns milhares de litros. Em consequência, admitiu-se a possibilidade de alguns ecopontos duplicarem ou mesmo triplicarem a sua capacidade de papel através da colocação de um ou dois recipientes suplementares para papel, ficando assim com 5 ou mesmo 6 recipientes.

Em termos de modelo, essa informação ficou consubstanciada na tabela "ECOPONTOS", (quadro 4.1).

ID	Modelo	CapacidadeLixo	CapacidadePapel	CapacidadePlastico	CapacidadeVidro	Custo
1	Swingomat	4000.0	15000.0	3000.0	3000.0	30650.0
5	Liftomatic	1000.0	2000.0	800.0	800.0	2840.0
3	Citytainer	3000.0	3000.0	3000.0	3000.0	12280.0
...	...	...	...	...	...	...

TipoCustoRecolha	EscolhidoAlgures
3	?
1	?
2	?
...	...

**Quadro 4.1: Estrutura da tabela "ECOPONTOS"**

Cada linha da tabela corresponde a um "modelo" de ecopontos, caracterizado por pelo seu número de identificação (campo "ID"), pelas capacidades relativas aos 4 tipos de resíduos (campos "CapacidadeLixo", "CapacidadePapel", "CapacidadePlástico", "CapacidadeVidro"), pelo custo da sua implementação (campo "Custo"), pelo tipo de custo associado à recolha (campo "TipoCustoRecolha"). A última coluna desta tabela possui o campo "EscolhidoAlgures" que é uma variável binária que indica se esse "modelo" de ecoponto será escolhido ou não. Refira-se que, enquanto o tipo "Liftomatic" não exige dispositivo especial para a recolha dos resíduos, o tipo "Swingomat" exige a aquisição de um camião próprio. Já o tipo "Citytainer" exige a aquisição somente de um gancho ou grua adequado, o qual se pode adaptar a qualquer camião dos que habitualmente se usam na recolha. De notar que, a aquisição destes dispositivos suplementares para recolha só é requerida uma vez, qualquer que seja o número de ecopontos que o exijam. Assim, existe uma outra tabela, designada "TIPOSRECOLHA" (quadro 4.2), em que cada linha corresponde a um tipo

de recolha, campo "TipoCustoRecolha", e respectivo custo em euros, campo "CustoRecolha".

TipoCustoRecolha	CustoRecolha	EscolhidoAlgures
1	0	?
2	2300	?
3	144000	?

**Quadro 4.2: Tabela "TIPOSRECOLHA"**

Existe ainda uma última coluna nesta tabela, campo "EscolhidoAlgures" que é um vector de variáveis binárias que indicam se é escolhido ou não esse tipo de custo associado ao método da recolha dos resíduos.

A coluna "TipoCustoRecolha" da tabela "ECOPONTOS" permite a ligação da sua informação à informação contida na tabela "TIPOSRECOLHA".

Este modelo opta, em matéria de deposição de informação, por uma metodologia de tipo relacional. De facto, os ficheiros atrás descritos, bem como os que a seguir se apresentam, mais não são que tabelas de uma base de dados relacional, e como tal serão doravante designados. Este modo de organizar os dados e as próprias variáveis de decisão, para além de ser conveniente na sua exposição, é o pressuposto para a utilização de um servidor de algoritmos existente no DEC/FCTUC e que calculará as soluções do modelo matemático como adiante será descrito. (Alçada, 2006).

Para além da informação correspondente aos dados do problema (normalmente designados por parâmetros), essas tabelas contêm também campos correspondentes aos resultados obtidos pela resolução do problema (também designados por variáveis). É o que acontece com o campo "EscolhidoAlgures", da tabela "TIPOSRECOLHA" e com o campo "EscolhidoAlgures" da tabela "ECOPONTOS", referido anteriormente. Aquando da submissão dos dados, são colocados nesses campos os caracteres "?". Portanto os caracteres "?" indicam que esse campo é um vector de variáveis. Na solução do problema que for adoptada, no lugar dos "?" surgirão os correspondentes valores das variáveis.

### 1.4.2 Quantidades de resíduos produzidos

Os dados relativos às fracções não residentes foram obtidos por amostragem e inquérito. Em cada categoria de estabelecimento, definida na Classificação de Actividades Económicas (CAE<sup>8</sup>, 2003), foram seleccionados um pequeno número de estabelecimentos nos quais se indagou as quantidades de resíduos produzidas nas suas 4 componentes (papel, plástico, vidro e resíduo indiferenciado). Tendo-se verificado alguma dispersão nos resultados dos inquéritos optou-se pelas medianas das amostras como estimativas das quantidades médias de resíduos produzidos (Murteira, 1990; Oliveira, 1991) correspondentes a cada tipo de estabelecimento. Esta informação foi condensada nas seguintes tabelas:

- a) "NAORESIDENCIAIS", (quadro 4.3), com os campos: "Edifício", "Rua", "Fraccao", "CAE". Cada linha desta tabela corresponde a uma fracção não residencial, contendo o código do correspondente edifício, o número da fracção, o número da rua onde se localiza e o código CAE da correspondente actividade.

Edifício	Rua	Fraccao	CAE
00A01	3	3	93020
00A03	3	3	99998
01R01	54	54	51000
...	...	...	...

**Quadro 4.3: Estrutura da tabela "NAORESIDENCIAIS"**

CAE	Papel	Vidro	Plast	Geral
15000	1	2.5	5	5
15810	1	2.5	5	5
22000	5	1	0.16	0
...	...	...	...	...

**Quadro 4.4: Estrutura da tabela "CAEPESOS"**

- b) "CAEPESOS" (quadro 4.4), com os campos: "CAE", "Papel", "Vidro", "Plast", "Geral", onde a cada código CAE, se faz corresponder as estimativas obtidas para os diferentes tipos de resíduos.

---

<sup>8</sup> Foi aprovado em Novembro último o Dec\_Lei Nº 381/2007, uma nova versão (CAE-Rev 3) desta Classificação e que irá entrar em vigor a partir de Janeiro de 2008.

O campo "CAE" serve de ligação entre as duas tabelas.

As quantidades de resíduos apresentadas nestas tabelas encontram-se expressas em quilogramas. Porém, interessa fundamentalmente a apresentação dessas quantidades em termos de volume, conversão que é feita posteriormente, de acordo com as seguintes densidades (Tchobanoglous, Theisen, Vigil, 1993).

<b>Tipos de Resíduos</b>	<b>Densidades</b>
Papel	59Kg/m <sup>3</sup>
Vidro	169Kg/m <sup>3</sup>
Plástico	64Kg/m <sup>3</sup>
Resíduos indiferenciados	240Kg/m <sup>3</sup>

**Quadro 4.5: Densidades dos 4 tipos de resíduos**

De notar que estes valores correspondem a resíduos em estado não ou semi-compactado, como acontece nos depósitos de recolha urbana. Por exemplo, os resíduos indiferenciados correspondentes essencialmente a substâncias de natureza orgânica, portanto com densidades próximas da densidade da água (1000 kg/m<sup>3</sup>), aparecem aqui com apenas 240Kg/m<sup>3</sup>. De facto, nos recipientes de deposição parte do espaço é ocupado por ar.

Os dados relativos aos resíduos produzidos pelos residentes tiveram por base informação constante do Plano de Acção Municipal sobre Resíduos Sólidos Urbanos (PAMRSU, 2004), da Câmara Municipal de Coimbra, para o período de 2004 a 2016.

Obtiveram-se assim os seguintes volumes de resíduos por habitante e por dia:

- Papel: 0.44 litros;
- Vidro: 0.16 litros;
- Plástico: 0.071 litros;
- Geral: 4.76 litros

A informação correspondente à população residente ficou consubstanciada na tabela "RESIDENTES" (quadro 4.6) com os seguintes campos:

- "Edifício": o código do edifício;
- "Rua": número da rua;

- "Nfracç": número de fracções do edifício;
- "Nresiden": número de residentes.

Cada linha desta tabela corresponde a uma fracção residente. O campo "Nfracç", representa o número total de fracções do edifício, residenciais ou não.

Edifício	Rua	Nfracç	Nresiden
00A03	3	3	4
01R04	54	2	5
01R06	54	3	2
...	...	...	...

**Quadro 4.6: Estrutura da tabela "RESIDENTES"**

Sabido a produção por habitante nos vários tipos de resíduos e o número de residentes de cada fracção podem determinar-se os volumes de resíduos produzidos por cada fracção.

A ligação desta tabela à tabela das fracções não residentes é feita pelos códigos dos edifícios. Pelas somas (quatro somas) das quantidades de resíduos presentes nas duas tabelas e referentes a cada edifício, obtêm-se os volumes de resíduos produzidos em cada edifício. Toda esta informação é armazenada nas tabelas "SECTORES" e "SECTORES\_CANDIDATOS", juntamente com informação correspondente à topologia da rede (ver secção 1.5).

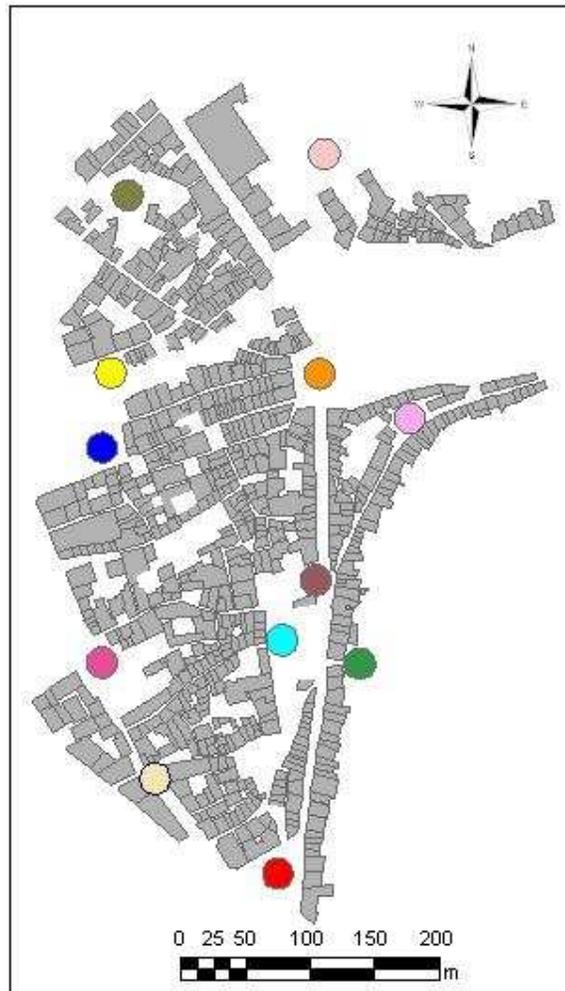
### 1.4.3 Locais Candidatos

Neste modelo não se considerou um número fixo de ecopontos a serem colocados em locais determinados pelo próprio modelo, como acontece nos problemas do tipo  $p$ -mediana. Optou-se por considerar variável o número de ecopontos a construir, aumentando assim a generalidade da metodologia. Trata-se assim mais de um problema do tipo cobertura.

Acontece porém que a localização de forma contínua ao longo da rede iria tornar o problema praticamente intratável por exigir uma infinidade de caminhos mais curtos entre a procura (produtores de resíduos) e a oferta (locais eleitos pelo modelo/agente de decisão para colocação de ecopontos). Por outro lado, essa localização contínua de ecopontos nem sequer é aceitável por razões de natureza física objectiva. A estreiteza da grande maioria das ruas impede a colocação no seu seio dos ecopontos. Além disso, existem também

problemas relativos à própria construção dos mesmos, visto se tratar de equipamentos/dispositivos subterrâneos o que pode acarretar, por exemplo, problemas ao nível das fundações dos edifícios, o que iria obrigar a sua colocação no eixo das vias porque também não há interesse em colocá-los junto à porta das habitações. De referir também, questões relativas a um melhor enquadramento deste tipo de dispositivos na paisagem urbana, de forma a proporcionar uma imagem urbana equilibrada e uniforme.

Os locais naturalmente vocacionados para a colocação são, pois, pracetas e largos da zona de estudo. Somente se considerou a possibilidade de colocação de ecopontos em locais situados em ruas, desde que, para além das restrições já mencionadas, se trate de ruas largas e junto a recantos (muros).



**Figura 4.5: Locais candidatos**

Considerou-se assim um número finito de locais elegíveis para a colocação da oferta, locais esses designados por "candidatos". O agente de decisão tendo em conta os resultados do modelo decidirá em quais destes se colocarão efectivamente os ecopontos.

Consideraram-se neste estudo 12 locais candidatos apresentados na figura 4.5.

A informação sobre os candidatos encontra-se na tabela "CANDIDATOS" (quadro 4.7) com os campos "ID", referente ao número do nó correspondente, o campo relativo à designação toponímica "Designacao", e por último o campo relativo ao número máximo de ecopontos que é permitido instalar no referido local candidato designado de "NumeroMaxEcopontos".

ID	Designacao	NumeroMaxEcopontos	Aberto
84	Terreiro da Erva	2	?
70	Rua João Cabreira	1	?
57	Largo das Olarias	1	?
30	Largo das Ameias	2	?
118	Praça do Comércio	1	?
17	Rua da Sota	2	?
7	Portagem	2	?
43	Rua Ferreira Borges	1	?
112	Pátio da Victória	2	?
68	Praça 8 de Maio	2	?
102	Pátio da Inquisição	1	?
11	Arco de Almedina	2	?

**Quadro 4.7: Estrutura da tabela "CANDIDATOS"**

As variáveis do vector "Aberto" indicam se o local foi escolhido. Em cada solução do modelo uma variável do vector "Aberto" é colocada com o valor "1" se no correspondente local candidato formem colocados ecopontos (e nesse caso diz-se que esse local é aberto), caso contrário a variável toma o valor "0".

O modelo admite a possibilidade de colocação de mais que um ecoponto no mesmo local. O campo "NumeroMaxEcopontos" estabelece o número máximo de ecopontos admissível em cada local candidato.

Existe também uma tabela com o cruzamento da informação contida nas tabelas "ECOPONTOS" e "CANDIDATOS". Trata-se do ficheiro "CANDIDATOS\_ECOPONTOS", que à partida corresponde fundamentalmente ao produto cartesiano dos outros dois. Cada linha desta tabela corresponde a um par "número de candidato - número do modelo de ecoponto" (campo "ID" no ficheiro "Ecopontos"). Esta tabela tem os seguintes campos:

- "Candidato": correspondente ao número do candidato;
- "Ecoponto": correspondente ao número do modelo de ecoponto (ID na tabela "ECOPONTOS");
- "Lixo", "Papel", "Plástico" e "Vidro": capacidades do modelo nos vários tipos de resíduos;
- "Custo": como sendo o custo de implementação (não incluindo o custo adicional de recolha, constante na tabela "TIPOSRECOLHA").

Candidato	Ecoponto	Lixo	Papel	Plastico	Vidro
84	1	4000.0	15000.0	3000.0	3000.0
70	1	4000.0	15000.0	3000.0	3000.0
57	4	3000.0	5000.0	3000.0	3000.0

Custo	NumEcopontos
30650.0	?
30650.0	?
12510.0	?

**Quadro 4.8: Estrutura do ficheiro "CANDIDATOS\_ECOPONTOS"**

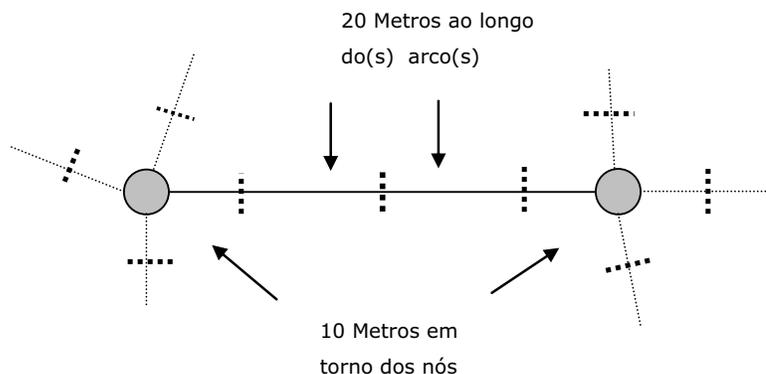
Em cada elemento do vector "NumEcopontos" é colocado pelo modelo o número de ecopontos efectivamente a serem construídos nos candidatos respectivos. Assim, se a uma solução do problema corresponder a colocação de um ecoponto do tipo 2 no candidato 84, o correspondente valor do campo "NumEcopontos" tomará o valor 1. De notar que a soma das variáveis do campo "NumEcopontos" correspondentes a um candidato deverá não superar o número máximo de ecopontos atribuído a esse candidato na tabela "CANDIDATOS".

O modelo permite também a proibição de colocação de certos tipos de ecopontos em determinados candidatos, por exemplo os ecopontos com abertura da tampa em ângulo recto não poderão ser colocados junto a muros o que impediria a abertura total da tampa. É o que acontece nos locais: Arco de Almedina (Rua Ferreira Borges) e Pátio Victória (na Rua Corpo de Deus). Tal é possível eliminando na tabela "CANDIDATOS\_ECOPONTOS" as linhas correspondentes aos pares proibidos. Outra solução seria a fixação com o valor zero das correspondentes variáveis do vector "NumEcopontos", transformando-as em parâmetros, mas não foi esta a estratégia adoptada neste estudo.

### 1.5 A Rede

A topologia da área em estudo foi representada através de um grafo não orientado, dado tratar-se de suporte a deslocações pedonais. A nós desse grafo correspondem parcelas e intersecções ou entroncamentos de ruas. Os arcos do grafo correspondem a troços de ruas situados entre nós.

Os sectores formam definidos com comprimentos de 20 metros, traçados ao longo dos arcos, excepto nos sectores que terminam no nó ou partem do nó, ou seja nas extremidades de ruas (arcos). Nesse caso consideraram-se sectores de 10 metros de comprimento. Assim, os nós da topologia também são considerados como pontos centrais de sectores, embora de desenho ligeiramente diferente, como se observa na figura 4.6. Supondo que a procura se concentra no ponto médio de cada sector, estamos perante uma rede em que para além dos nós da topologia, a área se encontra polvilhada com pontos produtores de resíduos, os pontos intermédios dos sectores.



**Figura 4.6: Sectores intermédios dum arco e sectores junto a nós**

Por conseguinte, a oferta de resíduos é considerada como distribuída segundo partes de arcos de aproximadamente 20 metros cada, os sectores. Assim, cada sector é encarado como um produtor de uma determinada quantidade de resíduos, produtor esse localizado no ponto médio do sector. Ora, uma rede corresponde a um grafo em que aos elementos constituintes (arcos ou nós) se faz corresponder determinados atributos. A cada destes pontos correspondem, além do seu número identificador, os atributos quantidades de resíduos produzidos (4 quantidades), número de pessoas e número de fracções.

Assim, o cálculo das distâncias entre os produtores de resíduos e os locais de recolha sofre um erro máximo de 10 metros.

Obviamente, a geometria dos edifícios e o facto do comprimento das ruas quase nunca ser múltiplo de 20 metros, provocaram ligeiras variações, sector a sector, neste esquema. Por outro lado, e como a unidade fundamental neste esquema é a fracção (Vide secção 1.4.1, em particular as tabelas "NAORESIDENCIAIS" e "RESIDENTES"), há edifícios pertencentes a mais do que um sector, de acordo com a localização das portas de saída das suas fracções.

A informação correspondente à topologia da rede encontra-se na tabela "TOPOLOGIAREDE" (quadro 4.9), com os seguintes campos:

- "Sector": número do sector;
- "Arco": número do arco;
- "Rua": número da rua onde se encontra o arco (os arcos são troços de ruas como já foi referido);
- "Edifício": Código do edifício;
- "Dist\_Org": Cada arco corresponde a dois nós, um designado por origem e o outro final. Este campo indica a distância em metros do sector ao nó origem;
- "Dist\_Dest": Representa a distância ao nó final;
- "No\_Orig": Nó origem do arco;
- "No\_Fim": Nó final do arco;
- "Comp\_Arc": É o comprimento do arco;

Cada linha desta tabela corresponde a um par (sector, edifício), caso o edifício tenha fracções nesse sector.

Sector	Arco	Rua	Edifício	Dist_Org	Dist_Dest	No_Orig
1	1	55	58A02	0	57,5	2
1	1	55	58A03	0	57,5	2
2	2	54	59A07	0	19	2
3	3	54	59A05	0	24	3

No_Fim	Comp_Arc
16	57,5
16	57,5
3	19
4	24

**Quadro 4.9: Estrutura da Tabela "TOPOLOGIAREDE"**

São também determinados os caminhos de cada sector para todos os nós. Essa informação está inserida na tabela "CAMINHOS" (quadro 4.10) constituída pelos campos "NSector", "NNO", "Dist" e "Caminho" a seguir descritos:

- "NSector": o número do sector;
- "NNO": o número do nó;
- "Dist": Distância total entre o sector e o nó;
- "Caminho": neste campo apresentada a sequência de nós que compõe o caminho respectivo entre o sector e o nó candidato.

NSector	NNO	Dist	Caminho
40	84	645,5	18 1 2 13 12 11 53 55 155 146 131 130 129 160 117
40	118	189	18 1 2 13 12 16
...	...	...	...

**Quadro 4.10: Estrutura da tabela "CAMINHOS"**

## 1.6. Distâncias Sectores-Candidatos

Para além dos atributos atrás referidos, os pontos da rede correspondentes aos sectores, deverão ter também informação correspondente às respectivas distâncias aos vários nós candidatos. Sendo de admitir que os cidadãos utilizarão os caminhos mais curtos para o transporte dos seus resíduos aos ecopontos a si consignados, essas distâncias deverão ser os comprimentos desses mesmos caminhos mais curtos.

Do cruzamento da informação constante nas tabelas "NAORESIDENCIAIS", "RESIDENTES" e "CAEPESOS", pode obter-se, por soma dos dados referentes às fracções situadas em cada sector, os números totais de residentes e de fracções, bem como as quantidades totais de resíduos, correspondentes aos vários sectores. A essa informação é acoplada a informação correspondente às distâncias sector\_candidato obtidas da tabela "TOPOLOGIAREDE", após a aplicação dos algoritmos atrás referidos. Por fim, resulta a tabela "SECTORES\_CANDIDATOS" (quadro 4.11), com os campos seguintes:

- "Sector": número de identificação do sector;
- "NumTotPessoas": indicando número total de pessoas (residentes e não residentes) do sector (sobre esta questão, ver secção 3 deste capítulo);
- "Fraccoes": indicando o número de fracções de cada sector;
- "Lixo", "Papel", "Plastico" e "Vidro": volumes de resíduos produzidos no sector, em litros;
- "Candidato": indica o número de identificação do candidato;
- "Distancia": distância do ponto médio do sector ao candidato;
- "DistanciaPesada": produto do número de pessoas pelo número de fracções;
- "Agrado": valor calculado da função de satisfação (Ver secção 3.2 do capítulo II), objectivos (Zhou *et al*, 2005) correspondente à distância;
- "AgradoPesado": produto do valor da função satisfação pelo número de fracções;
- "PessoasPróximas": igual ao número de pessoas do sector se a distância for menor ou igual que 10 metros. Zero no caso contrário. Representa assim o número de pessoas do sector situadas até 10 metros do candidato (como se consideram concentradas no ponto médio ou são todas ou nenhuma).
- "FraccoesAfastadas": igual ao número de fracções caso a distância seja maior que 100 metros, é zero no caso contrário. Significado similar ao do campo anterior;
- "Fraccoes10-100m": igual ao número de fracções caso a distância pertença ao intervalo ]10m, 100m]. Zero no caso contrário.

- “Escolhido”: variável binária onde cada elemento terá valor 1 se ao grupo de produtores de resíduos desse sector, forem atribuídos os ecopontos do candidato, terá o valor zero se não o for.

Cada elemento do vector “Escolhido” indica, para uma solução do problema se há ou não consignação do candidato a ecoponto escolhido.

Sector	NumTotPessoas	Fraccoes	Lixo	Papel	Plastico	Vidro
239	9	4	34.88	33.05	0.35	3.08
233	7	3	29.01	10.67	1.92	0.98
233	7	3	29.01	10.67	1.92	0.98
243	9	3	39.05	52.88	8.17	5.06
...	...	...	...	...	...	...



Candidato	Distancia	DistanciaPesada	Agrado	AgradoPesado	PessoasPróximas
84	20	80	23.9	215.1	0
84	45	135	22.0	154.0	0
70	183	549	5.7	39.9	0
84	102	306	12.4	111.6	0
...	...	...	...	...	...



FracçõesAfastadas	Fraccoes10-100m	Escolhido
0	9	?
0	7	?
7	0	?
9	0	?
...	...	...

**Quadro 4.11: Tabela “SECTORES\_CANDIDATOS”**

A cada linha desta tabela corresponde um par sector-candidato. Em cada solução do problema, cada elemento do vector de variáveis binárias (“Escolhido”) é colocado com o valor 1 se aos produtores de resíduos do respectivo sector forem atribuídos os ecopontos desse candidato. Portanto, na solução do modelo escolhida pelo agente de decisão, obtém-se nesta tabela a forma como os ecopontos são consignados aos produtores de resíduos.

O modelo permite a existência de uma distância máxima admissível para os percursos de transporte dos resíduos. No presente estudo admitiu-se para esse limite os 200 metros

(Zhou et al, 2005). Isso é obtido através da eliminação, nesta tabela, de todos os pares (linhas) com distâncias superiores a esse valor máximo admitido.

## **2. Abordagem à Avaliação Multiobjectivo**

### **2.1 Princípios**

A grande parte dos problemas do mundo real caracteriza-se por envolverem múltiplos e conflituosos objectivos possuindo o espaço de pesquisa das soluções uma elevada complexidade. Os modelos multiobjectivo tratam a minimização ou maximização de várias funções objectivo em simultâneo.

Em termos gerais, um problema de programação linear com objectivos múltiplos consiste na optimização de  $n$  funções objectivo lineares sujeitas a um conjunto de restrições lineares que definem o espaço de pesquisa.

Ao problema multiobjectivo não se aplica o conceito de solução óptima porque uma solução que satisfaça as restrições e minimize um dos objectivos pode (o que geralmente acontece) não minimizar os outros. Neste tipo de problemas pretende-se identificar soluções pertencentes a um conjunto especial (soluções não dominadas, eficientes ou de Pareto, a definir adiante nesta secção), para que o agente de decisão possa seleccionar a "melhor" solução de compromisso, de entre essas soluções não dominadas geradas.

Nos problemas de optimização multiobjectivo, as funções objectivo podem ser maximizadas ou minimizadas, tal como nos problemas com um só objectivo. Por uma questão de simplificação, considerar-se-á apenas problemas de minimização, uma vez que é possível converter qualquer problema que envolva a maximização de objectivos num problema de minimização, multiplicando por **-1** as funções objectivo a maximizar.

Um problema de optimização multiobjectivo (com  $n$  objectivos) é definido da seguinte forma:

$$\text{Min } f_j(\bar{X}), j=1, \dots, n \quad [4.19]$$

$$\begin{aligned} & \text{s.a:} \\ & \bar{X} \in \phi \end{aligned} \quad [4.20]$$

Em [4.19], encontram-se as  $n$  funções, funções objectivo, a otimizar. A expressão [4.20] corresponde a um conjunto de condições a que o vector  $\bar{X} = (X_1, \dots, X_k)$  de  $k$  variáveis (de decisão) deve obedecer (vide Cap. II, 3).  $\phi$  é assim o conjunto de valores  $\bar{X}$  que satisfazem as restrições, designado por região admissível ou conjunto de soluções possíveis. Convém notar que nos problemas de optimização combinatoria, como é o caso deste estudo, a região admissível é discreta, uma vez que os domínios dos vários componentes de  $\bar{X}$  são conjuntos discretos (de alternativas possíveis, geralmente em número finito mas muito elevado).

As funções objectivo constituem o espaço dos objectivos (de dimensão  $n$ ). Assim, a cada solução,  $\bar{X}$ , pertencente à região admissível corresponde um ponto  $(f_1(\bar{X}), \dots, f_n(\bar{X}))$  no espaço dos objectivos.

Considerem-se duas soluções  $\bar{X}, \bar{Y} \in S$ . Diz-se que  $\bar{X}$  domina  $\bar{Y}$  se  $f_j(\bar{X}) \leq f_j(\bar{Y})$ , para todo o  $j \in \{1, \dots, n\}$ , e existir pelo menos um  $j \in \{1, \dots, n\}$  tal que  $f_j(\bar{X}) < f_j(\bar{Y})$ . Uma solução  $\bar{X} \in S$  diz-se não dominada, ou eficiente, se não existir outra solução  $\bar{Y} \in S$  que a domine.

Nos problemas multiobjectivo, em vez de se conseguir uma única solução óptima, o que geralmente se obtém é um conjunto de soluções de compromisso. Uma forma de obter soluções não dominadas consiste no método da soma pesada, em que os  $n$  objectivos são substituídos por um único, correspondente a uma soma pesada dos  $n$  objectivos originais, transformando-se o problema num problema monoobjectivo (Steuer, 1986). Alterando os valores relativos dos pesos, outras soluções não dominadas poderão ser obtidas. Os valores dos pesos utilizados traduzem graus de preferência para o decisor, atribuindo naturalmente maior peso aos objectivos que entende terem maior importância no contexto do problema. Estas soluções são geradas pelo modelo multiobjectivo, e permitem ao planeador uma compreensão geral dos tradeoffs ou relações de compromisso entre os vários objectivos

(Coutinho-Rodrigues, 2003). Numa situação ideal, caso fosse possível a obtenção simultânea dos melhores valores para todos os objectivos, estávamos perante o que se designa de "solução ideal" ou ponto ideal,  $\bar{z}$ , definida por  $\bar{z} = \left( \min_{\bar{X} \in S} f_1(\bar{X}), \dots, \min_{\bar{X} \in S} f_n(\bar{X}) \right)$ , (Zeleny, 1982). É portanto o vector dos óptimos das  $n$  funções objectivo, tomadas individualmente.

## 2.2. Soluções

A análise das soluções nos problemas multiobjectivo surge como uma fase relevante na interacção do agente de decisão com o sistema. Este deverá, de acordo com o seu sistema de preferências, realizar experiências de forma a orientar, por exemplo, a pesquisa para regiões do espaço dos objectivos que lhe pareçam mais promissoras ou interessantes (Coutinho-Rodrigues *et al*, 1997). As preferências do agente de decisão são comunicadas ao SGBD, onde os parâmetros se encontram armazenados e sobre o qual é construído o modelo matemático em seguida transmitido ao módulo de resolução e geração de soluções. Estas são devolvidas ao SGBD onde ficam disponíveis para visualização.

O conhecimento exaustivo das soluções é geralmente uma atitude irrealista visto que, em função da dimensão do problema, o número de soluções pode tornar-se exponencialmente crescente. No entanto, os sistemas proporcionam, à partida, processos para a análise de soluções. Um dos processos consiste na *matriz payoff*, de dimensão  $n \times n$ . Cada linha desta matriz é composta pelo óptimo de uma função objectivo, tomada isoladamente, juntamente com os valores que as restantes funções objectivo tomam nesse ponto. Os "piores" valores que surgem nessa matriz, para as diferentes funções objectivo, constituem um ponto designado por anti ideal ou nadir. Assim, considerando os valores que um objectivo toma nos óptimos dos restantes objectivos, o "pior" desses valores é o componente desse objectivo no nadir. Usando os valores óptimos individuais dos vários objectivos, também presentes nesta tabela, constroi-se o ponto ideal (vide secção 2.1 deste capítulo).

Ainda em relação à visualização gráfica, (Coutinho-Rodrigues *et al*, 1997) apresenta uma técnica, designada de BAGAL (*Best AGAINst the Least*), que se baseia nos conceitos de ponto ideal e ponto anti ideal. O BAGAL permite a representação gráfica e compreensão das soluções em forma de diagrama de radar, no espaço dos objectivos.

As técnicas descritas, da soma pesada para gerar soluções, do BAGAL para as visualizar no espaço dos objectivos, juntamente com o SIG para obter visualização sobre mapas, formam usadas neste trabalho. Os resultados obtidos são descritos no capítulo V.

### **3. Objectivos**

Como já referido anteriormente, este modelo contém quatro objectivos, os quais serão expostos mais em pormenor nesta secção. A ordem pela qual os objectivos foram colocados nada tem a ver com qualquer ordem de precedência ou importância nos referidos. O custo total do sistema é o objectivo 1 neste modelo. Nesse custo considerou-se não só os custos de implementação propriamente ditos mas também os custos associados à aquisição de dispositivos especiais para a recolha (vide secção 1.4.1 deste capítulo).

Como objectivo 2 temos a média dos comprimentos dos percursos de transporte dos resíduos por parte dos utentes desde as suas fracções até aos respectivos ecopontos. Convém notar que se trata de uma média pesada pelo número de fracções. Daí o campo "DistanciaPesada" da tabela "SECTORES\_CANDIDATOS" (vide quadro 4.11). Acontece que, por cada fracção, normalmente somente uma pessoa de cada vez transportará os respectivos resíduos. Assim, preferiu-se, neste caso considerar-se a distância pesada pelo número de fracções. Poder-se-á contra argumentar dizendo que uma fracção com mais pessoas produzirá mais resíduos; porém os respectivos habitantes poderão distribuir entre si os transportes dos resíduos. Obviamente, uma filosofia diferente quanto a esta questão poderá ser adoptada através da manipulação do campo "DistanciaPesada" da tabela "SECTORES\_CANDIDATOS".

Antes de se apresentar os outros dois objectivos considerados, importa referir que os ecopontos estão incluídos no grupo de serviços denominados de "semi obnoxios" (ver secção 2.3 do capítulo II). De facto os utentes não os querem muito longe mas, por outro lado, também não os querem muito perto, em virtude de eventuais maus cheiros, barulhos nocturnos devidos à recolha, problemas de acesso às lojas comerciais devido à sua colocação, etc.

O carácter semi obnoxio ou semi indesejável destes equipamentos deverá pois encontrar-se plasmado em um ou mais objectivos do problema. Uma possibilidade para tal seria o uso da função de aceitação (ver secção 2.3 do capítulo II), encontrando-se inclusivamente a

tabela "SECTORES\_CANDIDATOS" preparada para tal. Porém, da observação experimental de dados sobre o problema, concluiu-se não haver vantagem significativa do seu uso relativamente às abordagens mais usuais. De resto, os dados referentes aos inquéritos para essas funções não foram obtidos no local da área em estudo, a qual tem características populacionais peculiares, nomeadamente o maior peso de habitantes nos segmentos etários extremos (jovens e idosos). Além disso há que contar com a questão das fracções de serviços e comércio. Ora o estudo realizado (Zhou *et al*, 2005) não aborda esta faceta do problema.

Optou-se assim por minimizar, em dois objectivos, os números de produtores colocados a distâncias extremas dos ecopontos. Num dos objectivos (o objectivo 3) tenta-se minimizar o número de pessoas com ecopontos colocados a até 10 metros da respectiva porta<sup>9</sup>. Portanto, cada pessoa funciona aqui como um voto de "rejeição". Coloca-se aqui a questão de saber quantos votos atribuir a uma fracção não residencial. Optou-se neste estudo por atribuir dois votos. Porém, numa abordagem mais pormenorizada deste aspecto, poder-se-á atribuir números de votos diferentes aos vários estabelecimentos, colocando os totais de votos para cada sector no campo "PessoasProximas" da tabela "SECTORES\_CANDIDATOS".

O outro objectivo (no modelo, o objectivo 4) será, assim, a minimização do número de produtores colocados a mais de 100 metros do respectivo ecoponto, considerando-se, tal como no objectivo 2, e pelos mesmos motivos, cada fracção a contar como um voto (também de "rejeição"). Obviamente poderá adoptar-se estratégia diferente, colocando no campo "FraccoesAfastadas", não o número de fracções mas antes o número de pessoas neste intervalo de distâncias.

### **3.1 Modelo Matemático**

Seguidamente apresenta-se o modelo matemático formal deste problema, (Tralhão *et al*, 2008).

Parâmetros ("inputs") e variáveis do modelo:

---

<sup>9</sup> Trata-se de um qualquer ecoponto e não propriamente o ecoponto ao qual a pessoa está afectada.

$C$	Conjunto dos números de identificação (nós) dos locais candidatos; corresponde ao campo "Candidato" da tabela "CANDIDATOS";
$F$	número total de fracções (residentes ou não);
$K$	Conjunto dos quatro tipos de resíduos, $\{\text{Lixo indiferenciado, Papel, Plástico, Vidro}\}$ ;
$M$	Conjunto dos números de identificação dos modelos de ecopontos, corresponde ao campo "ID" da tabela "ECOPONTOS";
$S$	Conjunto dos números de identificação dos sectores; corresponde ao campo "Sector" da tabela SECTORES_CANDIDATOS;
$T$	Conjunto dos tipos de custos adicionais de recolha; corresponde ao campo "TipoCustoRecolha" das tabelas "TIPOSRECOLHA" e "ECOPONTOS";
$\alpha_j$	Número máximo de ecopontos permitidos no candidato $j \in C$ ; corresponde ao campo "NumeroMaxEcopontos" da tabela "CANDIDATOS" (vide quadro 4.7); parâmetro inteiro;
$c_m$	Custo de implementação de um ecoponto do modelo $m \in M$ ; corresponde ao campo "Custo" da tabela "ECOPONTOS"; parâmetro real;
$c'_t$	Custo adicional de recolha correspondente ao tipo $t \in T$ ; corresponde ao campo "CustoRecolha" da tabela "TIPOSRECOLHA" (vide quadro 4.2); parâmetro real;
$d_{i,j}$	Distância entre o sector $i \in S$ e o candidato $j \in C$ ; corresponde ao campo Distancia da tabela "SECTORES_CANDIDATOS" (vide quadro 4.11); parâmetro real;
$\delta_{i,j}$	Número de pessoas (residentes ou não) do sector $i \in S$ colocadas a até 10m do candidato $j \in C$ ; corresponde ao campo "PessoasProximas" da tabela "SECTORES_CANDIDATOS"; parâmetro inteiro;
$f_i$	Número de fracções do sector $i \in S$ ; corresponde ao campo "Fraccoes" da tabela "SECTORES_CANDIDATOS"; parâmetro inteiro;
$f'_{i,j}$	Número de fracções do sector $i \in S$ ; colocadas a mais de 100m do candidato $j \in C$ ; corresponde ao campo "FraccoesAfastadas" da tabela "SECTORES_CANDIDATOS"; parâmetro inteiro;

$g_{m,k}$	Capacidade (em litros) do contentor para resíduos do tipo $k \in K$ , no modelo $m \in M$ de ecoponto; corresponde, na tabela "ECOPONTOS" (vide quadro 4.1), às quatro colunas relativas às capacidades para os diferentes tipos de resíduos; parâmetro real;
$r_t$	1 se for escolhido algum ecoponto com custo adicional de recolha do tipo $t \in T$ , 0 no caso contrário; corresponde ao campo "EscolhidoAlgures" da tabela "TIPOSRECOLHA" (vide quadro 4.2); variável binária;
$u_m$	1 se o modelo $m \in M$ de ecoponto for escolhido para algum ecoponto, 0 no caso contrário; corresponde ao campo "EscolhidoAlgures" da tabela "ECOPONTOS" (vide quadro 4.1); variável binária;
$u'_{m,t}$	1 se o modelo $m \in M$ de ecoponto pertencer ao tipo $t \in T$ de custos adicionais de recolha; uma forma para a sua concretização consiste na adição de $\#T$ colunas à tabela "TIPOSRECOLHA" (vide quadro 4.2) com os valores destes parâmetros; parâmetro binário;
$\omega_{i,k}$	Quantidade (em litros) de resíduos do tipo $k \in K$ produzida no sector $i \in S$ ; corresponde aos campos Lixo, Papel, Plastico e Vidro da tabela "SECTORES_CANDIDATOS"; parâmetro real;
$x_{i,j}$	Toma o 1 se ao sector $i \in S$ for atribuído o local $j \in C$ para a deposição dos seus resíduos; toma o valor 0 no caso contrário; corresponde ao campo "Escolhido" da tabela "SECTORES_CANDIDATOS"; variável binária;
$y_{j,m}$	Número de ecopontos do modelo $m \in M$ a serem colocados no candidato $j \in C$ ; corresponde ao campo "NumEcopontos" da tabela "CANDIDATO_ECOPONTO", (vide quadro 4.8); se ao par $(j,m)$ não corresponder uma linha na tabela, então $y_{j,m} = 0$ ; variável inteira;
$y'_j$	1 se o candidato $j \in C$ for aberto, 0 no caso contrário; variável binária; corresponde ao campo "Aberto" da tabela "CANDIDATOS", (vide quadro 4.7);

**Objectivos:**

$$\text{Min } \sum_{j \in C} \sum_{m \in M} c_m \cdot y_{j,m} + \sum_{t \in T} c'_t \cdot r_t \quad [4.21]$$

(minimiza o custo total)

$$\text{Min } \frac{1}{F} \sum_{i \in S} \sum_{j \in C} f_i d_{i,j} x_{i,j} \quad [4.22]$$

(minimiza a média das distâncias a que as fracções ficam dos respectivos ecopontos)

$$\text{Min } \sum_{i \in S} \sum_{j \in C} \delta_{i,j} y'_j \quad [4.23]$$

(minimiza o número de pessoas com ecopontos a até 10m)

$$\text{Min } \sum_{i \in S} \sum_{j \in C} f'_{i,j} x_{i,j} \quad [4.24]$$

(minimiza o número de fracções a mais de 100m dos respectivos ecopontos)

s. a:

$$\sum_{j \in C} x_{i,j} = 1, \quad i \in S \quad [4.25]$$

(garante que a cada sector é atribuído um local para depósito dos seus resíduos; #S -- número total de sectores --restrições)

$$\sum_{m \in M} y_{j,m} \leq \alpha_j, \quad j \in C \quad [4.26]$$

(garante que o número de ecopontos a colocar no local  $j \in C$  não ultrapassa o número máximo de ecopontos para esse local; #C - número total de candidatos - restrições)

$$\kappa \sum_{m \in M} y_{j,m} \geq \sum_{i \in S} x_{i,j}, \quad j \in C, \kappa \geq \#S \quad [4.27]$$

(coloca pelo menos um ecoponto no local  $j \in C$ , se pelo menos um sector lhe for atribuído;  $\kappa$  é uma constante inteira arbitrária não inferior ao número total de sectores;  $\#C$  restrições)

$$\sum_{m \in M} g_{m,k} \cdot y_{j,m} \geq \sum_{i \in S} w_{i,k} \cdot x_{i,j}, \quad j \in C, k \in K \quad [4.28]$$

(garante que a capacidade instalada no local  $j \in C$  é suficiente;  $\#C \cdot \#K$  restrições)

$$\kappa' \cdot y'_j \geq \sum_{m \in M} y_{j,m}, \quad j \in C, \kappa' \geq \sum_{j \in C} \alpha_j \quad [4.29]$$

(garante e assinala a abertura do local candidato  $j \in C$  caso lá seja colocado um ecoponto;  $\kappa'$  é uma constante inteira arbitrária superior ao número total máximo de ecopontos;  $\#C$  restrições)

$$\kappa' \cdot v_m \geq \sum_{j \in C} y_{j,m}, \quad m \in M, \kappa' \geq \sum_{j \in C} \alpha_j \quad [4.30]$$

(garante e assinala a abertura do local candidato  $j \in C$  caso lá seja colocado um ecoponto;  $\kappa'$  é uma constante inteira arbitrária superior ao número total máximo de ecopontos; tantas restrições quanto o número  $\#M$  de modelos de ecoponto)

$$\kappa'' \cdot r_t \geq \sum_{m \in M} v'_{m,t} \cdot v_m, \quad t \in T, \kappa'' \geq \#M \quad [4.31]$$

(garante que assinala a abertura do local candidato  $j \in C$  caso lá seja colocado um ecoponto;  $\kappa''$  é uma constante inteira arbitrária superior ao número total modelos de ecoponto; tantas restrições quanto o número  $\#T$  de tipos de custos adicionais de recolha)

$$d_{i,j} \cdot x_{i,j} \leq D, \quad i \in S, j \in C \quad [4.32]$$

(garante que todas as distâncias entre os sectores e respectivos locais de deposição não ultrapassam um valor máximo,  $D$  ; considerou-se  $D = 200\text{m}$  ; estas  $\#C.\#S$  restrições são, na prática, desnecessárias porque na tabela "SECTORES\_CANDIDATOS" podem retirar-se previamente as linhas correspondentes a distâncias superiores a  $D$  ).

# Capítulo V - Geração de Soluções e Análise de Resultados

---

## 1. Introdução

Antes de mais convém notar que pode acontecer, e é o que actualmente acontece, grande parte dos resíduos produzidos pelas fracções de comércio e serviços terem métodos próprios de recolha, quer através de um veículo apropriado que percorre a zona e recolhe os resíduos estabelecimento a estabelecimento, quer através de acordos directos para fornecimento de resíduos a empresas de tratamento e reciclagem. Assim, é de admitir que uma parte dos resíduos produzidos por este grupo não seja depositada nos ecopontos. Aliás, em virtude do seu tamanho, alguns nem sequer poderão ser introduzidos nos marcos de deposição, necessitando serem previamente fragmentados.

Consideraram-se três instâncias do problema. Na primeira instância, designada "SORESIDENTES", considerou-se a situação em que os ecopontos se destinam apenas aos resíduos produzidos pelos residentes, mantendo-se assim a actual situação de recolha, em paralelo, dos outros resíduos. Numa segunda instância, designada "TODOS", considerou-se o caso em que todos os resíduos são depositados nos ecopontos. Trata-se portanto de uma situação de carga máxima. Na terceira instância, designada "RENOVAÇÃO", considerou-se que, numa situação futura pós-renovação da zona, somente 50% dos resíduos produzidos por não residentes serão depositados nos ecopontos.

Com efeito, existem já algumas iniciativas para a renovação urbana da zona (constituição de uma SRU-Sociedade de Reabilitação Urbana, um levantamento físico dos edifícios e sócio-económico dos residentes e actividades existentes, abertura de concurso público para escolha de um parceiro privado para a reabilitação urbana da 1ª unidade de intervenção, etc.) e foi nesse contexto que se considerou a terceira instância como não tendo por base a situação actual, mas sim uma projecção referente a um possível cenário pós-renovação.

Em todas estas instâncias a aproximação foi complicada devido a vários factores. Primeiro, o modelo matemático subjacente é complexo e difícil de resolver optimamente. Segundo a natureza multiobjectivo da decisão aumenta a complexidade computacional da geração, análise e comparação de soluções não dominadas. Além disso, o decisor não tem em geral “destreza” em programação matemática ou em técnicas de decisão multiobjectivo, podendo mesmo nem estar sensibilizado para técnicas científicas de apoio à decisão.

O primeiro factor foi endereçado através da redução da complexidade do problema, tal como se descreve no capítulo IV (sectores, concentração da produção em pontos discretos, etc.), ficando com 249 sectores e 875 pares sector-candidato, o que se traduz por 875 variáveis binárias a que há que juntar as variáveis correspondentes aos campos “EscolhidoAlgures”, da tabela “TIPOSRECOLHA” (vide quadro 4.2), “EscolhidoAlgures” da tabela “ECOPONTOS” (vide quadro 4.1) e da tabela “CANDIDATOS\_ECOPONTOS” (vide quadro 4.8). O número de variáveis nestes dois últimos grupos pode depender da instância, sendo de aproximadamente 100, o que dá para o problema perto de 1000 variáveis binárias. O terceiro factor é endereçado através da apresentação dos resultados, para as soluções não dominadas de interesse, através de um conjunto de quadros e gráficos de colunas relativamente fáceis de interpretar, e de mapas coloridos com as afectações entre os edifícios e os candidatos abertos. Parte desses quadros e gráficos, juntamente com os mapas, encontram-se em anexo. Uma outra ferramenta gráfica, também aqui considerada, para fácil visualização e comparação de soluções não dominadas, e também para a pesquisa de soluções adicionais que possam ter interesse (eventualmente através da introdução no modelo de restrições adicionais, de forma a pesquisar soluções não dominadas existentes em determinada zona do espaço da pesquisa) é o “BAGAL” (Coutinho-Rodrigues *et al*, 1997).

## 2. Instância "SORESIDENTES"

Nesta instância considerou-se que todos os resíduos produzidos pelos não residentes têm recolha paralela, pelo que os ecopontos se destinam somente aos resíduos produzidos por residentes. Tal não significa que as fracções de não residentes não tenham peso na decisão de colocação dos ecopontos. No objectivo respeitante à minimização do número de pessoas situadas próximo dos ecopontos (a até 10m), essas fracções continuam a contribuir com duas pessoas por fracção. De facto, apesar de, neste cenário, os ecopontos não se lhes destinarem, provavelmente continuarão a não os desejarem à porta.

Estimou-se para a referida instância um total de 6100 litros para resíduos indiferenciados, em contraste com os 570 litros, 200 litros, e 90 litros respectivamente para o papel o vidro e o plástico. Isto sugere claramente a escolha de um conjunto de ecopontos para a tabela "ECOPONTOS" (vide quadro 4.1), em que haja predominância nas componentes de resíduos indiferenciados. No quadro 5.1 apresenta-se a configuração desta tabela para esta instância do problema, já com os valores do campo variável "EscolhidoAlgures" para a solução "Goal Linf" (ver mais adiante).

ID	Modelo	CapacidadeLixo	CapacidadePapel	CapacidadePlastico	CapacidadeVidro	Custo	TipoCustoRecolha	EscolhidoAlgures
1	Citytainer_1(TNL)	5000.0	3000.0	3000.0	3000.0	12510.0	2	0
2	Citytainer_1(TNL)	3000.0	3000.0	3000.0	3000.0	12280.0	2	0
3	Liftomatic(Saniservice)	2000.0	1000.0	800.0	800.0	2840.0	1	0
4	Liftomatic(Saniservice)	1600.0	1000.0	800.0	800.0	2680.0	1	0
5	Liftomatic(Saniservice)	1000.0	1000.0	800.0	800.0	2610.0	1	1
6	Liftomatic(Saniservice)	800.0	800.0	800.0	800.0	2450.0	1	1

**Quadro 5.1:Tabela "ECOPONTOS", para a solução "Goal Linf", instância "SORESIDENTES"**

No quadro 5.2 encontra-se a configuração da tabela "TIPOSRECOLHA" para a mesma solução ("Goal Linf"). Pode constatar-se que, para esta solução somente são escolhidos ecopontos do tipo 1.

Da consideração das tabelas "TIPOSRECOLHA", "ECOPONTOS" e "CANDIDATOS\_ECOPONTOS", (vide secção 1.4 do capítulo IV), obtém-se, através dos respectivos campos correspondentes a vectores de variáveis (respectivamente "EscolhidoAlgures", "EscolhidoAlgures" e "NumEcopontos"), por selecção das linhas dessas tabelas com valores superiores a zero, após a junção dessas tabelas e eliminação de alguns campos menos relevantes, o plano de colocação de ecopontos correspondente a uma solução. É o que pode ser observado no quadro 5.3

TipoCustoRecolha	CustoRecolha	EscolhidoAlgures
1	0	1
2	2300	0
3	144000	0

**Quadro 5.2: Tabela "TIPOSRECOLHA", para a solução "Goal Linf", instância "SORESIDENTES"**

Candidato	Modelo	CapacidadeLixo	CapacidadePapel	CapacidadePlastico	CapacidadeVivro	Custo	CustoRecolha	NumEcopontos
7	Liftomatic(Saniservice)	800	800	800	800	2450	0	1
17	Liftomatic(Saniservice)	800	800	800	800	2450	0	1
30	Liftomatic(Saniservice)	800	800	800	800	2450	0	1
57	Liftomatic(Saniservice)	1000	1000	800	800	2610	0	1
68	Liftomatic(Saniservice)	1000	1000	800	800	2610	0	1
84	Liftomatic(Saniservice)	800	800	800	800	2450	0	1
102	Liftomatic(Saniservice)	800	800	800	800	2450	0	1
112	Liftomatic(Saniservice)	1000	1000	800	800	2610	0	1
118	Liftomatic(Saniservice)	1000	1000	800	800	2610	0	1

**Quadro 5.3: Plano de colocação dos ecopontos, solução "Goal Linf", instância "SORESIDENTES"**

Na figura A.1 aparece um quadro geral com resultados referentes a esta instância. Nas primeiras quatro colunas respectivamente "Custo Total", "Distância Média", "Pessoas Próximas" e "Fracções Afastadas" aparecem os valores para diferentes soluções não dominadas relativos aos correspondentes objectivos, bem como os desvios percentuais dos valores dos objectivos relativamente aos respectivos valores no ponto ideal, ou seja os respectivos óptimos individuais (colunas " $\Delta 1 \%$ ", " $\Delta 2 \%$ ", " $\Delta 3 \%$ " e " $\Delta 4 \%$ "):

$$\Delta_i = \left( \frac{obj_i}{opt_i} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad i=1, \dots, 4 \quad [4.33]$$

em que  $obj_i$  é o valor do objectivo  $i$  e  $opt_i$  o valor do correspondente óptimo.

Cada linha desta tabela corresponde a uma solução não dominada, a saber:

- "Opt 1", "Opt 2", "Opt 3" e "Opt 4": correspondentes respectivamente aos óptimos dos quatro objectivos tomados individualmente;
- "Pesos iguais": correspondente à solução dando iguais "relevos"  $(w_1, w_2, w_3, w_4) = (25\%, 25\%, 25\%, 25\%)$  aos quatro objectivos;
- "Pesos 30, 10, 30, 30": solução em que se dá "relevos"  $(w_1, w_2, w_3, w_4) = (30\%, 10\%, 30\%, 30\%)$ , respectivamente ao primeiro objectivo ("Custo Total"), segundo objectivo, "Distância Média", terceiro objectivo, "Pessoas Próximas", e quarto

objectivo ("Fracções Afastadas") (ver mais adiante o significado destas percentagens);

- "Pesos 20, 0, 50, 30": similar à anterior, mas com relevos  $(w_1, w_2, w_3, w_4) = (20\%, 0\%, 50\%, 30\%)$ ;
- "Custo < 20000": relevo igual a todos os objectivos mas com restrição adicional de limitação do custo total a 20000 euros.
- "Goal L1" e "Goal Linf": soluções obtidas utilizando "Goal Programming" (Mine e Storbeck, 1991; Tamiz e Jones, 1997); na "Goal L1" minimiza-se a distância, no espaço dos objectivos, da solução ao ponto ideal, segundo a métrica  $L_1$ ; na "Goal Linf", a mesma distância, mas segundo a métrica  $L_\infty$ . De salientar que as distâncias se referem a pontos resultantes da normalização dos objectivos segundo [4.33]. Portanto estas soluções correspondem à minimização de L1 e Linf, definidos em [23].

As duas últimas linhas desta tabela correspondem aos componentes do ponto ideal e do nadir.

Deve notar-se que os "relevos" atrás referidos,  $(w_1, w_2, w_3, w_4)$ , não são os pesos actuais que são usados no modelo,  $(\bar{w}_1, \bar{w}_2, \bar{w}_3, \bar{w}_4)$ , (Alçada et al, 2008). Estes são gerados através dos valores óptimos individuais  $(opt_1, opt_2, opt_3, opt_4)$  para os objectivos 1 a 4, usando a expressão:

$$\bar{w}_i = w_i \frac{\sum_{j=1}^4 opt_j}{opt_i}, \quad i = 1, \dots, 4; \quad [4.34]$$

Deste modo, os pesos relativos,  $w_i$ , reflectirão o impacto relativo (e subjectivo) dado pelo decisor aos 4 objectivos.

Os valores presentes nas colunas "L1", "L2" e "Linf" são obtidos da seguinte forma (Alçada et al, 2008):

$$\left\{ \begin{array}{l} L1 = \sum_{i=1}^4 \Delta_i \\ L2 = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \Delta_i^2} \\ L \text{ inf} = \max_i \Delta_i \end{array} \right. \quad [4.35]$$

ou seja o comprimento do vector  $(\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4)$  segundo as correspondentes métricas.

Convém notar que, na obtenção do óptimo individual de um objectivo, os outros objectivos também se encontram presentes, mas afectados de pesos muito pequenos (em teoria deveriam ser "infinitesimais", e é assim que são designados, por abuso de linguagem). Tal permite que os pontos obtidos, no espaço dos objectivos correspondentes a esses óptimos, sejam soluções não dominadas.

Na figura A.2 apresenta-se o BAGAL correspondente às 10 soluções obtidas para esta instância. Apesar de a escolha por uma solução ser tarefa do agente de decisão, parece ser a solução "Goal Linf" a que apresenta maior equilíbrio. No entanto, talvez seja a solução "Custo < 20000 " a mais recomendável em virtude de apresentar melhores valores para o custo e para o número de pessoas próximas dos ecopontos, objectivos que parecem revestir-se de maior importância.

Do cruzamento da informação contida na tabela "TOPOLOGIAREDE" com a da tabela "SECTORES\_CANDIDATOS" (vide quadro 4.11) e a da tabela "CANDIDATOS" (vide quadro 4.1), e após selecção das linhas correspondentes a valores diferentes de zero das correspondentes variáveis de decisão, pode obter-se a afectação dos edifícios aos candidatos abertos. Convém notar que edifícios existem em que, devido ao posicionamento das portas (por exemplo, portas em alçados distintos para ruas diferentes), haja fracções pertencentes a diferentes sectores (neste estudo, não mais do que dois). Isto pode conduzir a que ao mesmo edifício possam ser atribuídos dois locais de deposição. Do cruzamento, e após a eliminação de campos não pertinentes, resulta uma tabela, presente parcialmente no quadro 5.4.

Numero	Color
78P01	999999
18R16	998998
01R04	100084
...	...
68R23	118068
68R24	100068
...	...
68R25	118068
...	...
69R04	118112
...	...
CAN007	118112
CAN011	800011
...	...

**Quadro 5.4 – Afecção de edifícios aos candidatos abertos, solução “Goal Linf”, instância “SORESIDENTES”**

Nesta tabela, no campo “Numero” aparece o número de código do edifício no SIGUrb, e no campo “Color”, um código de 6 dígitos decimais que indica a afecção. Este código consta de dois grupos de três dígitos, em cada dos quais estão os números dos candidatos. Por exemplo, o edifício 69R04 deposita resíduos, consoante as suas fracções, nos locais 118, “Praça do Comércio” e 112, “Pátio Victória” (vide tabela “CANDIDATOS”, quadro 4.7). Os códigos correspondentes a edifícios afectos a um só local começam por 100. É o caso dos edifícios 01R04 (afecto ao local 84, “Terreiro da Erva”) e o 68R04, afecto ao candidato 68, “Praça 8 de Maio”. Os códigos relativos a edifícios com local atribuído começam sempre pelo dígito 1, o que faz com que, por exemplo, um edifício afecto aos candidatos 43 e 7 (não presente no quadro 5.4) fique com o código 143107. Não há qualquer problema de ambiguidade porque não existem números de candidatos separados por 100 (por exemplo, existe o candidato 112, mas não o 12). Estes códigos foram elaborados com este formato porque vão servir para a codificação das cores com que os edifícios vão aparecer em mapas que permitem a visualização gráfica dessas afecções em ambiente SIG. O código 999999 indica que o edifício tem “polígono” no SIGUrb, mas não tem informação, ou então edifícios entretanto desaparecidos, por ruína, ou em vias de demolição, como é o caso dos edifícios colocados no percurso da linha do METRO em construção. O código 998998 indica que, para a instância em questão, o edifício não tem produtores de resíduos. Normalmente a estes

dois códigos é atribuído o branco (eventualmente também ao bordo, para a sua total ocultação<sup>10</sup>).

Nesta tabela aparecem os falsos edifícios "CAN007", "CAN011", etc., correspondentes aos "polígonos" representadores dos locais candidatos (vide, por exemplo, figura A.3, em anexo). Nestes, os códigos começados pelo dígito 8 indicam que o candidato não é aberto na solução em causa (campo "Aberto" da tabela "CANDIDATOS", vide quadro 4.7).

Na figura A.3, apresenta-se um mapa colorido com as afectações dos edifícios aos locais abertos, para a solução "Goal Linf". Cada edifício com afectação a dois candidatos tem as cores correspondentes a esses candidatos, uma no interior e a outra no bordo do polígono correspondente a esse edifício. Na apresentação deste mapa em grande escala (vide figura, de pormenor, A.4), surgem dentro dos polígonos os códigos acima definidos, com as afectações dos vários edifícios. Os locais candidatos são representados por círculos. Atribuindo aos códigos começados por 8 a cor branca (e também aos respectivos bordos) consegue-se a sua ocultação, quando não abertos.

Na figura A.5 apresenta-se um gráfico de colunas com valores percentuais dos objectivos relativamente aos respectivos óptimos individuais,  $\frac{obj_i}{opt_i} \cdot 100\%$ , para as várias soluções não dominadas obtidas. Trata-se de um conjunto de vários histogramas. Cada cor corresponde a um objectivo, cada grupo de quatro colunas corresponde aos valores dos objectivos para uma uma solução. Este diagrama torna bem patente a correlação positiva existente entre os objectivos 2, "Distância Média", e 4, "Fracções Afastadas".

Na figura A.5 surge um BAGAL com todas as soluções não dominadas obtidas para esta instância. Esta representação esquemática consta de um semi-eixo por cada objectivo (no nosso caso, 4 semi-eixos). Uma solução é representada no BAGAL por um polígono, numa determinada cor, com os vértices nos pontos dos semi-eixos correspondentes aos valores dos objectivos para essa solução. As soluções geradas aparecem na região compreendida entre dois limites constituídos por polígonos regulares, um interior correspondente ao ponto ideal e um exterior correspondente ao nadir (ou anti-ideal). De notar, que os valores dos objectivos em cada solução se encontram-se normalizados de forma a aparecerem numa mesma escala. Trata-se de uma normalização diferente da apresentada em [4.33]. Para

---

<sup>10</sup> Em certos ambientes SIG, existem outras formas de ocultação.

cada solução, o vértice,  $p_i$ , do respectivo polígono, no eixo correspondente ao objectivo  $i$ , é dado por:

$$p_i = \frac{A-B}{nad_i - opt_i} (obj_i - opt_i) + B \quad [4.36]$$

em que  $nad_i$  é o valor do objectivo  $i$  no nadir,  $opt_i$  é o óptimo individual do objectivo  $i$  e  $obj_i$  o valor desse objectivo para essa solução. Os polígonos regulares correspondentes ao nadir e ao ponto ideal têm diagonais, respectivamente  $A$  e  $B$ ,  $B > A$ . Normalmente faz-se  $B=1$  e dá-se a  $A$  um valor adequado basicamente dependente do tamanho que se deseja para o diagrama.

### 3. Instância "TODOS"

Nesta instância considerou-se que todos os resíduos produzidos pelos não residentes são depositados nos ecopontos. Trata-se de uma perspectiva um tanto irrealista, mas com interesse pelo seu carácter balizador das condições do problema. É esta a situação de maior complexidade temporal na resolução computacional do problema, o que não impediu a obtenção de dez soluções não dominadas dos mesmos dez tipos das obtidas para a instância "SORESIDENTES", com excepção da solução "Custo < 20000", agora substituída pela solução "Custo < 175000" (restrição adicional com limitação do custo a 175000 euros, dando o mesmo relevo a todos os objectivos): "Opt 1", "Opt 2", "Opt 3" e "Opt 4", "Pesos iguais", "Pesos 30, 10, 30, 30", "Pesos 20, 0, 50, 30", "Custo < 175000", "Goal L1" e "Goal Linf", com definições e formas de obter já tratadas na secção 2 deste capítulo.

Estimou-se para a referida instância um total de 73000 litros para o papel, 21000 litros de resíduos indiferenciados, 13000 litros de plástico e 14000 litros de vidro. Isto sugere claramente a escolha de um conjunto de ecopontos para a tabela "ECOPONTOS" (vide quadro 4.1,) em que haja predominância na componente do papel. No quadro 5.5 apresenta-se a configuração desta tabela para esta instância do problema, já com os valores do campo variável "EscolhidoAlgures" para a solução "Goal L1".

ID	Modelo	CapacidadeLixo	CapacidadePapel	CapacidadePlastico	CapacidadeVidro	Custo	TipoCustoRecolha	EscolhidoAlgueres
1	Swingomat(Saniservice)	4000	15000	3000	3000	30650	3	0
2	Swingomat(Saniservice)	3000	12000	3000	3000	29900	3	0
3	Citytainer_1(TNL)	3000	3000	3000	3000	12280	2	0
4	Citytainer_1(TNL)	3000	5000	3000	3000	12510	2	1
5	Liftomatic(Saniservice)	1000	2000	800	800	2840	1	1
6	Liftomatic(Saniservice)	800	2000	800	800	2760	1	1

**Quadro 5.5:Tabela“ECOPONTOS”, para a solução“Goal L1”, instância“TODOS”**

Nas figuras A.6, A.7 e A.8, em anexo, encontram-se respectivamente um quadro geral de resultados, um gráfico de colunas e um BAGAL com todas as soluções obtidas para esta instância do problema, todos de estrutura similar aos correspondentes já apresentados na secção 2 deste capítulo.

Da observação destas figuras parece resultar ser a solução “Goal L1” a mais equilibrada, visto apresentar uma boa redução no custo com ligeiro prejuízo na distância média e não muito excessivo número de fracções afastadas.

Na figura A.9 apresenta-se um mapa com as afectações aos edifícios aos candidatos abertos, para a solução “Goal L1”.

#### **4. Instância “RENOVAÇÃO”**

Nesta instância considerou-se a situação, mais realista, em que somente 50% dos resíduos produzidos pelas fracções de serviços ou comércio são depositados nos ecopontos. Isto traduz-se por um total de 38000 litros para o papel, 27000 litros de resíduos indiferenciados, 7000 litros de plástico e 7400 litros de vidro. Isto sugere claramente a escolha de um conjunto de ecopontos para a tabela “ECOPONTOS” em que haja predominância na componente do papel. Optou-se por tabela igual à da instância “TODOS”. A predominância do papel sobre os resíduos indiferenciados não é tão acentuada como na instância “TODOS” porque nesta instância se considerou uma projecção pós-renovação da área, implicando um acentuado aumento da população residente, passando dos actuais aprox. 1300 habitantes para aprox. 4000 habitantes.

Para a projecção referida, considerou-se uma volumetria média aproximadamente uniforme em toda a área, mantendo-se os actuais edifícios, com as mesmas áreas, mas com quatro pisos cada (r/c incluído). Os pisos 1, 2 e 3 seriam destinados a fracções residenciais, destinando-se os pisos térreos às actividades de serviços e comércio, facto que já acontece

na maioria dos casos, principalmente no que toca aos maiores produtores. Considerou-se também que os estabelecimentos comerciais ou de serviços mantinham as suas localizações e produções de resíduos actuais. A projecção da população residente futura, da sua distribuição pelas fracções, bem como a configuração destas, baseou-se essencialmente nas actuais áreas de implantação dos edifícios (que se pressupõe, para efeitos desta simulação, manterem-se no futuro)

Tendo por base o quadro 5.6 (NRGEU, 2005), e atendendo ao já exposto, procedeu-se da seguinte forma: partindo das áreas de implantação dos edifícios actuais, dimensionaram-se as tipologias de andares ajustadas a essas áreas. Por exemplo, um edifício com uma área de implantação de aprox. 74 metros quadrados seria ocupado por 3 fracções residenciais (correspondentes aos pisos 1, 2 e 3), de tipologia T2, cada uma destinada a habitação para 4 residentes, perfazendo um total de  $4 \times 3 = 12$  residentes para esse edifício. Convém notar que todas as projecções foram efectuadas considerando a lotação máxima das fracções.

Obtiveram-se dez soluções não dominadas, dos tipos já descritos na secção 2 deste capítulo, para a instância "SORESIDENTES", com a excepção de que a solução "Custo < 20000" foi agora substituída pela solução "Custo < 100000" (restrição adicional com limitação do custo a 100000 euros, dando o mesmo relevo a todos os objectivos).

Nas figuras A.10, A.11 e A.12, em anexo, encontram-se respectivamente um quadro geral de resultados, um gráfico de colunas e um BAGAL com todas as soluções obtidas para esta instância do problema, todos de estrutura similar aos correspondentes já apresentados na secção 2 deste capítulo.

Da observação destas figuras parece resultar ser a solução "Goal Linf" a mais equilibrada, visto apresentar uma boa redução no custo com ligeiro prejuízo na distância média e não muito excessivo número de fracções afastadas. É a solução seleccionada para o diagrama de afectação dos edifícios aos candidatos, presente na figura A.13, em anexo.

Dimensionamento e Localização de Ecopontos para a Baixa de Coimbra  
com Metodologia Multicritério e Tecnologia SIG

<b>TIPOLOGIAS</b>												
Número de quartos/lotação	T0/1	T1/2	T2/3	T2/4	T3/5	T3/6	T4/7	T4/8	T5/9	T5/10	T6/11	T6/12
Lotação máxima	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lotação provável	1	2	2/3	3	3/4	4	4/5	5	5/6	6	6/7	7
<b>ÁREAS POR COMPARTIMENTOS</b>												
Sala	12,0	12,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	18,0	18,0	18,0
Cozinha	4,5	4,5	5,0	5,0	5,5	5,5	6,0	6,0	6,5	6,5	6,5	6,5
Quartos		10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
			7,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
					7,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
							7,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
									7,0	9,0	9,0	9,0
											7,0	9,0
Suplem. refeições/estudo	2,0	2,0	1,0	4,5	2,5	6,0	4,0	7,5	5,5	10,0	9,5	13,0
Suplem. tratamento de roupa	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Instalações sanitárias	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
					2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
									1,5	1,5	1,5	1,5
Arrumos	1,5	2,0	2,0	2,5	2,5	3,0	3,0	3,5	3,5	4,0	4,5	4,5
Restante	3,5	5,5	7,0	8,0	7,0	8,0	9,5	10,5	10,5	11,5	13,0	15,0
<b>ÁREAS DO FOGO</b>												
Área habitável (mínima)	18,5	29,0	35,5	42,0	48,5	55,0	61,5	68,0	74,5	81,0	87,5	93,0
Área útil	30	43	51	59	67	75	83	91	99	107	115	123
Área bruta (Au x1,25)	38	54	64	74	84	94	104	114	124	134	144	154
<b>ÍNDICES</b>												
Área útil por morador (lotação máxima)	30,0	21,5	17,0	14,8	13,4	12,5	11,9	11,4	11,0	10,7	10,5	10,3
Área útil por morador (lotação provável)	30,0	21,5	20,4	19,7	19,1	18,8	18,4	18,2	18,0	17,8	17,7	17,6

**Quadro 5.6: Programa de áreas para cada tipologia justificado por compartimentos**

## 5. Análise e comparação de resultados

Da junção de tabelas, agora correspondentes a várias soluções da mesma instância do problema ou mesmo entre várias instâncias, é possível obter informação relevante para o estudo. Com exemplo, apresenta-se, no quadro a junção das tabelas "CANDIDATOS" (vide quadro 4.7) para as dez soluções da instância "SORESIDENTES", deixando ficar os campos "Aberto" e "ID". Esta tabela, a que se juntou uma última com totais, revela o grau de dispersão das localizações dos ecopontos, ao longo das várias soluções. Pode observar-se que as soluções que privilegiam o objectivo 3, "Pessoas Próximas" (ou mesmo o "Custo total", objectivo 1) tendem a concentrar os ecopontos, ao contrário do que acontece com as soluções que privilegiam o "Distância Média", objectivo 2, (veja-se a coluna 2) ou "Fracções Afastadas", objectivo 4, (veja-se a coluna 4).

Outro aspecto, aliás já referido, é, em todas as instâncias consideradas, uma grande correlação positiva entre os objectivos 2 ("Distância Média") e 4 ("Fracções Afastadas"),

sugerindo a possibilidade de eliminação de um destes objectivos. Parece ser preferível a eliminação do “Distância Média”, não só porque esta já se encontra confinada a valores razoáveis, por restrição, mas também porque pode continuar a aparecer nos quadros como o presente na figura A.1, em anexo, apesar de despromovida a mera grandeza para análise. Aliás, a observação desses quadros para as várias instâncias revela bem quão razoáveis são os valores que, em geral, apresenta.

ID	Opt 1	Opt 2	Opt 3	Opt 4	Pesos iguais	Pesos 30, 10, 30, 30	Pesos 20, 0, 50, 30	Custo < 175000	Goal L1	Goal Linf
84	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
70	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
57	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
118	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1
7	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
43	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
112	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
68	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
102	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>7</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>12</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>9</b>

**Quadro 5.7: Dispersão da distribuição dos ecopontos**

Ao invés dos dois objectivos acima, existe uma tendência para oposição entre o custo total, objectivo 1, e os outros três objectivos, tomados globalmente, principalmente em relação ao objectivo 3, “Pesooas Próximas”, o que tende a dificultar a vida ao decisor, uma vez serem exactamente estes dois objectivos (custo e proximidade dos ecopontos) os mais susceptíveis, ao que se julga, de vir a causar problemas, tomada a decisão. De qualquer forma, em nas três instâncias, parecem ser as soluções “Goal L1” e “Goal Linf” as mais equilibradas, a “Goal L1”, as quais aliás somente apresentam diferenças com algum significado na instância (pouco realista) “TODOS” .

Apesar de haver um valor indicativo de 500 habitantes/ecoponto, apresentado em (Pássaro, 2002), os valores aqui atingidos foram, em geral, inferiores, dada a natureza da malha urbana subjacente à zona em estudo, e aos tipos de contentores e respectivas capacidades que foram admitidos no estudo. A instância “RENOVAÇÃO” é a que mais se aproxima do referido valor indicativo.

## Capítulo VI - Conclusões e Perspectivas Futuras

---

Os problemas relacionados com a Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos na sociedade actual revestem-se de grande importância e elevada complexidade dado os diversos impactes que lhe podem ser associados. Nas sociedades modernas esses resíduos são caracterizados não só pela sua elevada (e crescente) quantidade mas também pela sua diversidade. Procurou-se, neste estudo, efectuar a aplicação de um modelo para localização e dimensionamento de ecopontos em meio urbano, conjuntamente com um servidor de algoritmos, e ainda com informação obtida quer no SIGUrb quer *in loco*, a uma situação concreta - a Baixa de Coimbra.

Uma das finalidades consistia em conseguir gerar configurações de capacidade e localização para estes tipos de equipamentos, e afectação dos utentes, atendendo à realidade da zona urbana em estudo, à natureza das suas ruas e praças com limitações quer para a circulação de veículos pesados quer para a implantação dos equipamentos, assumindo o conhecimento da distribuição dos geradores de resíduos. Outro fim era o de identificar vectores para um eventual refinamento e melhoria do sistema aplicado, nomeadamente no âmbito de um estudo mais abrangente para Coimbra, perspectivando ainda no caso da Baixa a situação futura decorrente dos efeitos do projecto de renovação urbana em curso. Tratou-se, assim, de um estudo experimental confinado a uma zona específica e muito

---

---

particular de uma cidade de média dimensão como é Coimbra.

Algumas conclusões podem ser já tiradas. Em primeiro lugar pode confirmar-se tratar-se de um modelo complexo, com muitas variáveis, o que levou a execuções computacionais relativamente demoradas. Este aspecto é particularmente importante neste tipo de problemas dado que as soluções não dominadas podem ser em número muito elevado sendo inviável o cálculo da sua totalidade. Uma possível tentativa de endereçamento desta questão será a consideração de sectores mais amplos (a fim de reduzir o seu número), não nos sectores situados junto aos nós da rede mas nos situados nos segmentos intermédios dos arcos. Em segundo lugar verificou-se também uma correlação positiva entre os objectivos 2 (média das distâncias percorridas) e o objectivo 4 (número de fracções a mais de 100 metros do respectivo ecoponto), o que pode sugerir (como pista para desenvolvimentos futuros) o teste de um modelo mais simples, triobjectivo, tanto mais que as distâncias a serem percorridas já se encontram limitadas por restrição que integra o próprio modelo usado. A passagem desta restrição a objectivo (um objectivo, de equidade, de minimização da distância máxima a percorrer) provavelmente iria aumentar a complexidade do problema uma vez que aumentava o número de linhas da tabela "SECTORES\_CANDIDATOS" e consequentemente o número de variáveis binárias.

Uma outra ideia para desenvolvimentos futuros será a afectação dos comprimentos dos percursos de factores relacionados com os respectivos declives. Isto poderá exigir a consideração de um grafo orientado (ou misto).

Com efeito, o teste da abordagem adoptada indica que um sofisticado modelo matemático de programação linear inteira, a análise multicritério, os SIG e técnicas de gestão de bases de dados podem ser integrados em sistemas de apoio à decisão que isentam os planeadores urbanos de conhecimentos muito especializados nessas áreas, para as suas tomadas de decisão, não só pela apresentação de resultados sob a forma de mapas mas também pela apresentação de gráficos, representações esquemáticas e quadros de leitura

muito intuitiva.

A estruturação dos dados e das variáveis do modelo sob a forma de tabelas relacionais revela-se também de extrema fecundidade neste tipo de problemas. Para além dos resultados aqui apresentados muitos outros poderão ser obtidos através de inquirições de álgebra relacional.

# **ANEXO**

Dimensionamento e Localização de Ecopontos para a Baixa de Coimbra  
com Metodologia Multicritério e Tecnologia SIG

Objectivos	Custo Total		Distância Média		Pessoas Próximas		Frações Afastadas		L1	L2	Linf
	€	Δ1 %	m/fracção	Δ2 %	nº	Δ3 %	nº	Δ4 %			
<b>Soluções</b>											
<b>Opt 1</b>	17 630.00	+0.00%	84.5	+30.02%	65	+51.16%	530	+129.44%	210.62%	142.38%	+129.44%
<b>Opt 2</b>	32 170.00	+82.47%	65.0	+0.00%	132	+206.98%	231	+0.00%	289.45%	222.80%	+206.98%
<b>Opt 3</b>	20 080.00	+13.90%	105.4	+62.13%	43	+0.00%	917	+296.97%	373.00%	303.72%	+296.97%
<b>Opt 4</b>	29 560.00	+67.67%	65.4	+0.66%	132	+206.98%	231	+0.00%	275.31%	217.76%	+206.98%
<b>Pesos Iguais</b>	22 690.00	+28.70%	75.2	+15.63%	55	+27.91%	352	+52.38%	124.61%	67.75%	+52.38%
<b>Pesos 30, 10, 30, 30</b>	22 530.00	+27.79%	76.0	+16.85%	55	+27.91%	352	+52.38%	124.93%	67.67%	+52.38%
<b>Pesos 20, 0, 50, 30</b>	22 370.00	+26.89%	84.3	+29.67%	48	+11.63%	475	+105.63%	173.81%	113.56%	+105.63%
<b>Custo &lt; 20 000</b>	19 920.00	+12.99%	81.4	+25.27%	53	+23.26%	445	+92.64%	154.15%	99.65%	+92.64%
<b>Goal L1</b>	22 690.00	+28.70%	75.2	+15.63%	55	+27.91%	352	+52.38%	124.61%	67.75%	+52.38%
<b>Goal Linf</b>	22 690.00	+28.70%	75.2	+15.63%	55	+27.91%	352	+52.38%	124.61%	67.75%	+52.38%
<b>Ideal</b>	17 630.00	+0.00%	65.0	+0.00%	43	+0.00%	231	+0.00%	0.00%	0.00%	+0.00%
<b>Nadir</b>	32 170.00	+82.47%	105.4	+62.13%	132	+206.98%	917	+296.97%	648.55%	376.42%	+296.97%

Figura A.1: Quadro dos Resultados para a instância "SORESIDENTES"

Dimensionamento e Localização de Ecopontos para a Baixa de Coimbra  
com Metodologia Multicritério e Tecnologia SIG

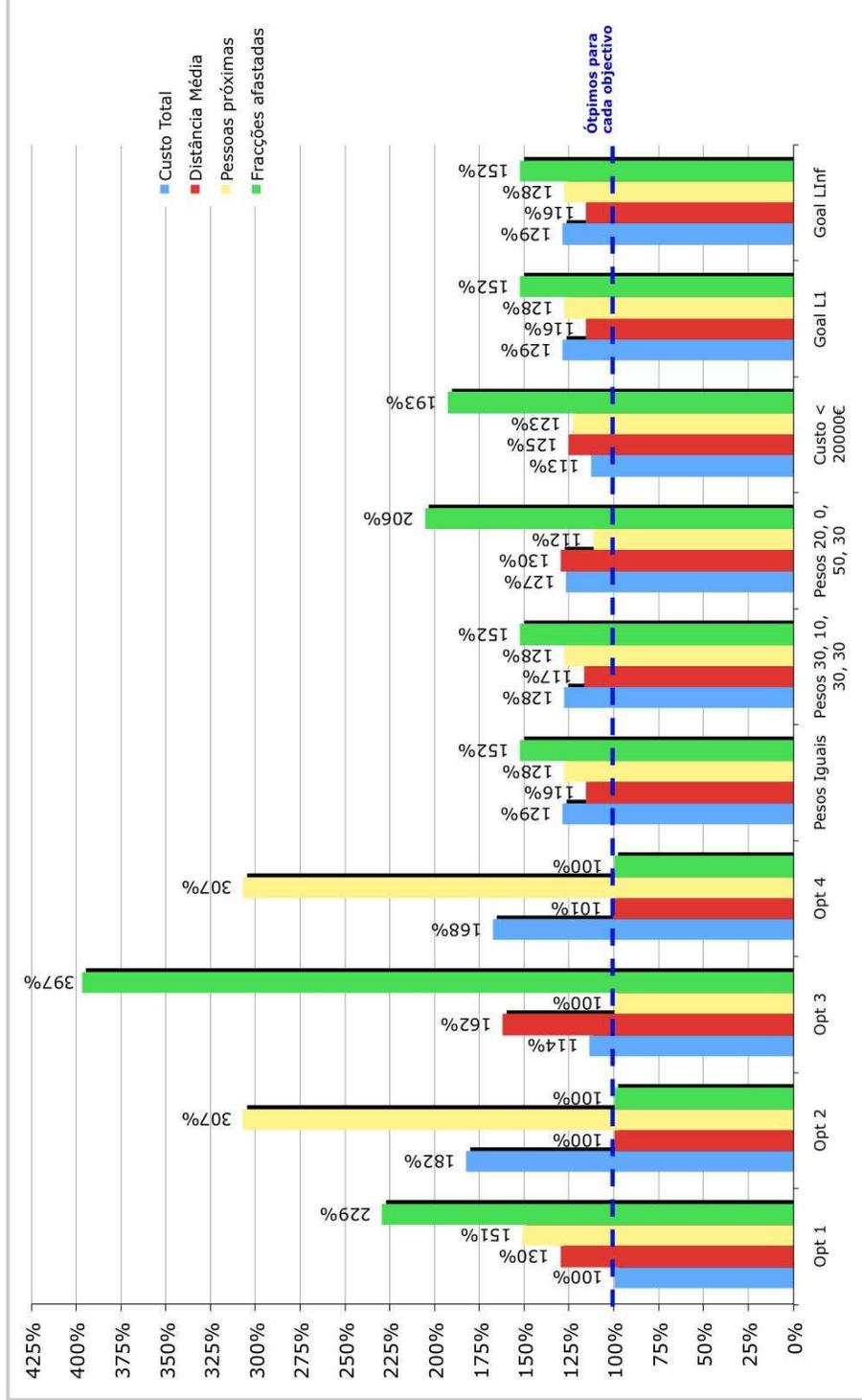


Figura A.2: Comparação das 10 soluções para a instância "SORESIDENTES"

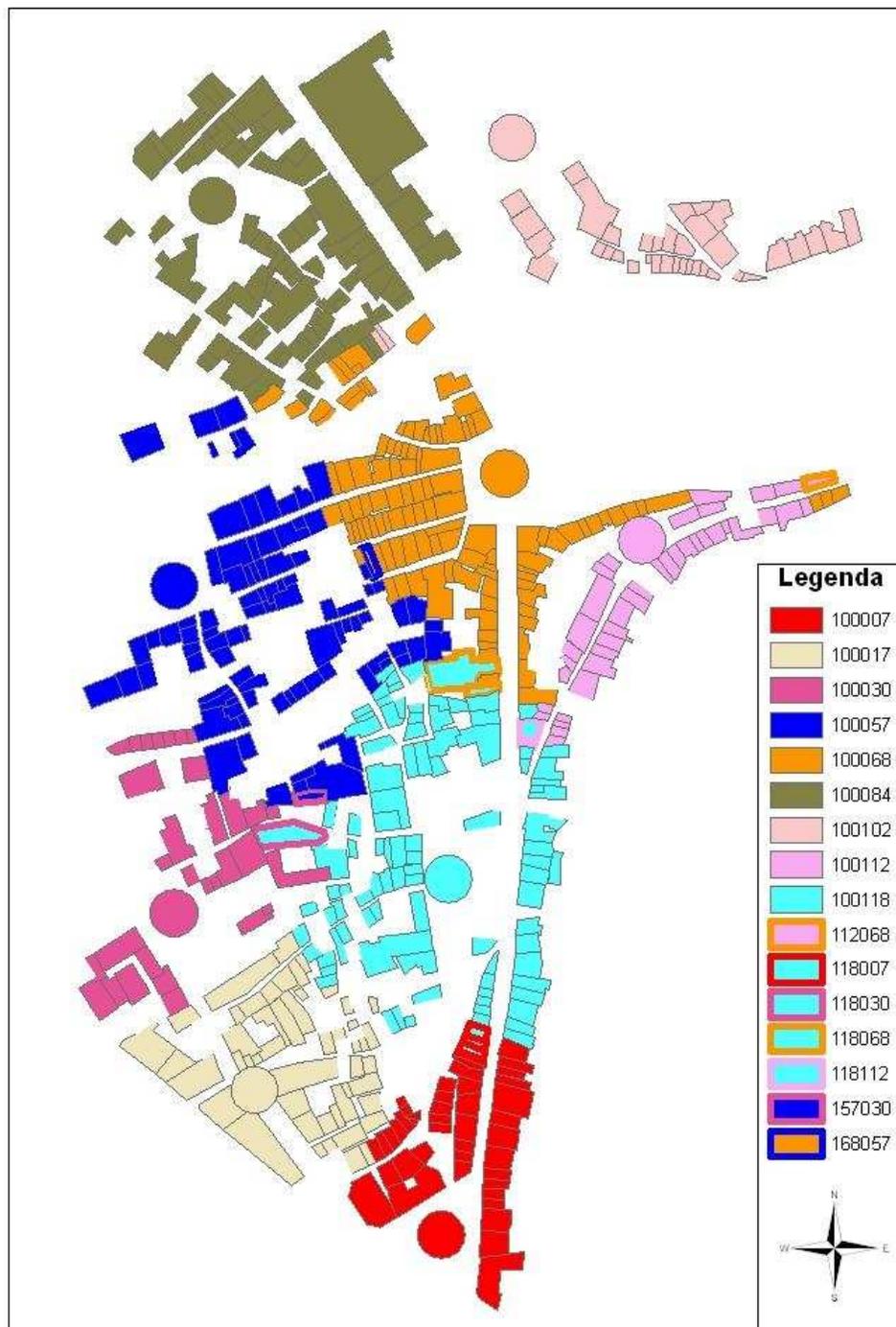
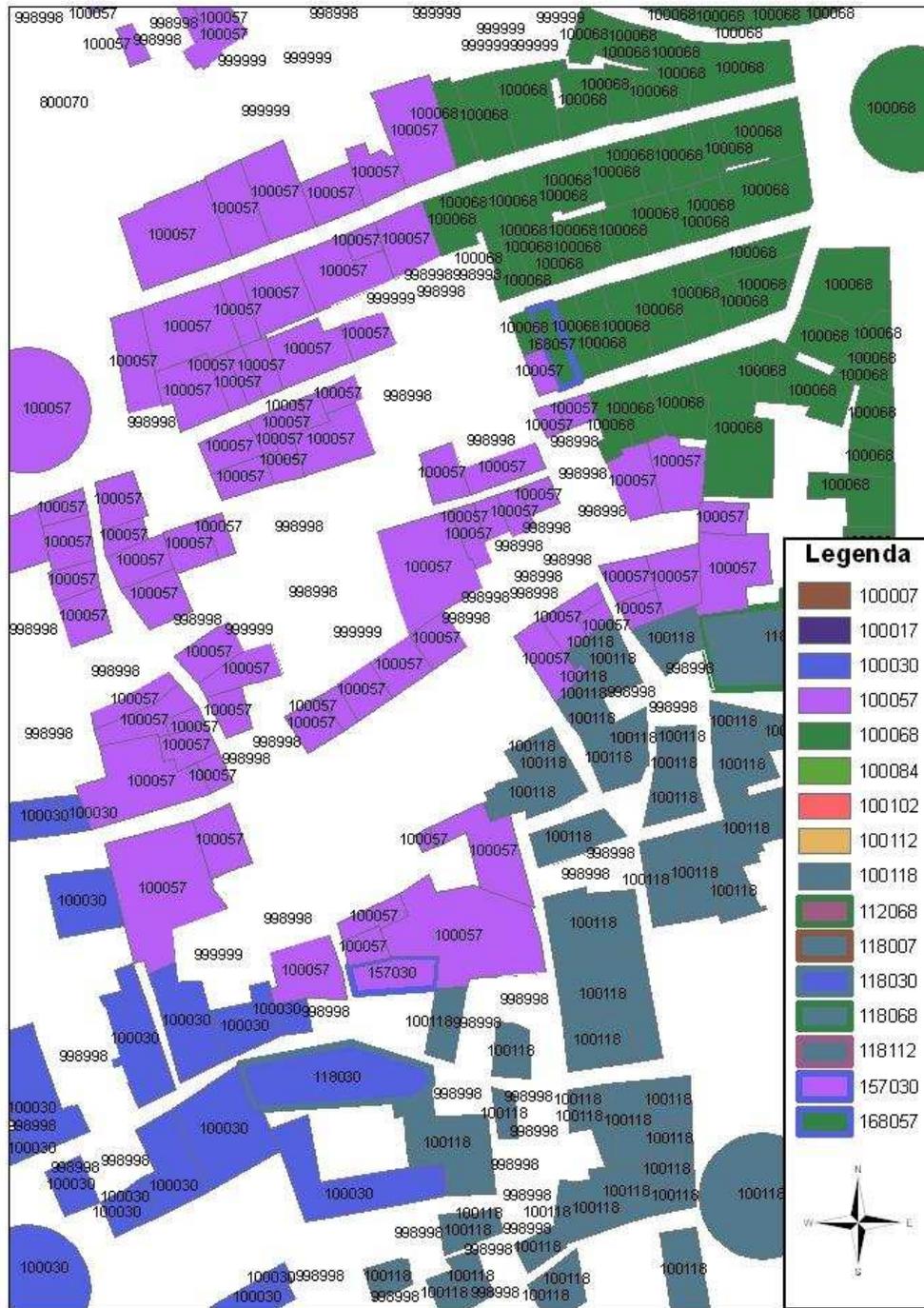


Figura A.3: Diagrama de afectações de edifícios, para a solução "Goal Linf" da instância "SORESIDENTES",



**Figura A.4: Diagrama de pormenor de afetações de edifícios, para a solução "Goal Linf" da instância "SORESIDENTES", revelando os códigos de afetação.**

Dimensionamento e Localização de Ecopontos para a Baixa de Coimbra  
com Metodologia Multicritério e Tecnologia SIG

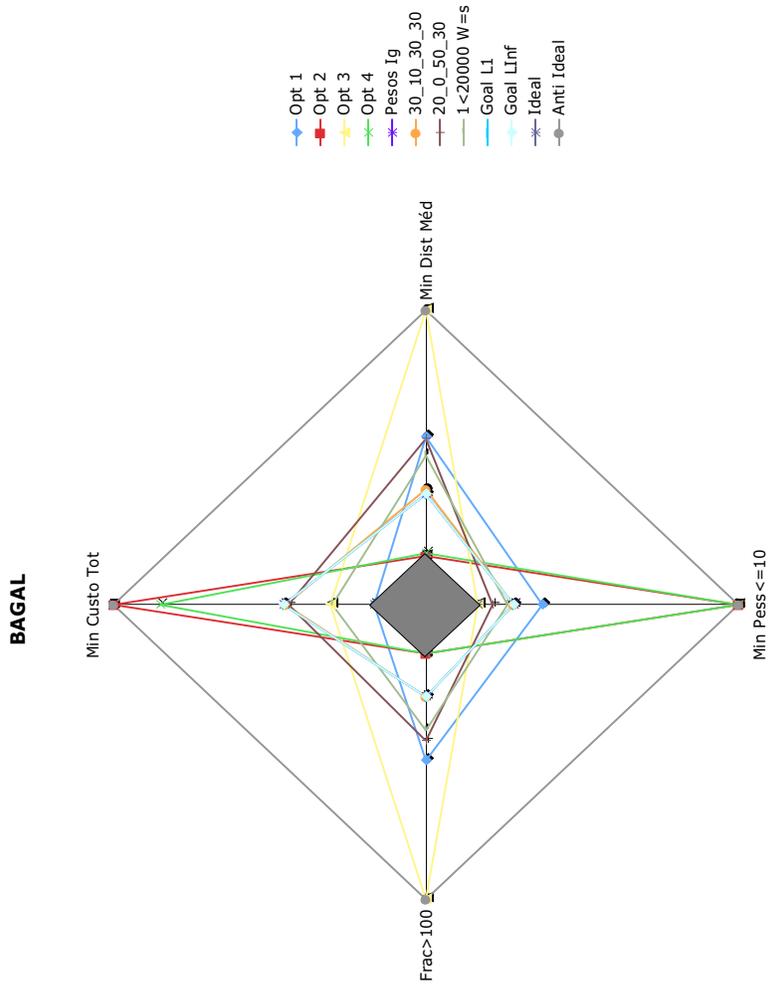


Figura A.5: BAGAL para a instância "SORESIDENTES"

Dimensionamento e Localização de Ecopontos para a Baixa de Coimbra  
com Metodologia Multicritério e Tecnologia SIG

Objectivos Soluções	Custo Total		Distância Média		Pessoas Próximas		Fracções Afastadas		L1	L2	Linf
	€	Δ1 %	m/fracção	Δ2 %	nº	Δ3 %	nº	Δ4 %			
<b>Opt 1</b>	167 510.00	+0.00%	90.5	+32.88%	132	+206.98%	553	+116.86%	356.72%	239.95%	+206.98%
<b>Opt 2</b>	338 980.00	+102.36%	68.1	+0.00%	132	+206.98%	272	+6.67%	316.01%	231.00%	+206.98%
<b>Opt 3</b>	361 390.00	+115.74%	105.5	+54.99%	43	+0.00%	941	+269.02%	439.75%	297.98%	+269.02%
<b>Opt 4</b>	325 170.00	+94.12%	70.1	+2.96%	132	+206.98%	255	+0.00%	304.06%	227.39%	+206.98%
<b>Pesos Iguais</b>	342 020.00	+104.18%	75.4	+10.74%	67	+55.81%	361	+41.57%	212.31%	125.75%	+104.18%
<b>Pesos 30, 10, 30, 30</b>	306 570.00	+83.02%	77.9	+14.46%	55	+27.91%	374	+46.67%	172.05%	100.29%	+83.02%
<b>Pesos 20, 0, 50, 30</b>	339 180.00	+102.48%	81.7	+19.94%	48	+11.63%	463	+81.57%	215.62%	133.00%	+102.48%
<b>Custo &lt; 175 000</b>	174 510.00	+4.18%	101.2	+48.56%	94	+118.60%	781	+206.27%	377.62%	242.88%	+206.27%
<b>Goal L1</b>	185 800.00	+10.92%	83.3	+22.37%	67	+55.81%	445	+74.53%	163.63%	96.38%	+74.53%
<b>Goal Linf</b>	208 060.00	+24.21%	82.2	+20.66%	67	+55.81%	434	+70.20%	170.88%	95.16%	+70.20%
<b>Ideal</b>	167 510.00	+0.00%	68.1	+0.00%	43	+0.00%	255	+0.00%	0.00%	0.00%	+0.00%
<b>Nadir</b>	361 390.00	+115.74%	105.5	+54.99%	132	+206.98%	941	+269.02%	646.73%	362.81%	+269.02%

Figura A.6: Quadro dos Resultados para a instância "TODOS"

Dimensionamento e Localização de Ecopontos para a Baixa de Coimbra  
com Metodologia Multicritério e Tecnologia SIG

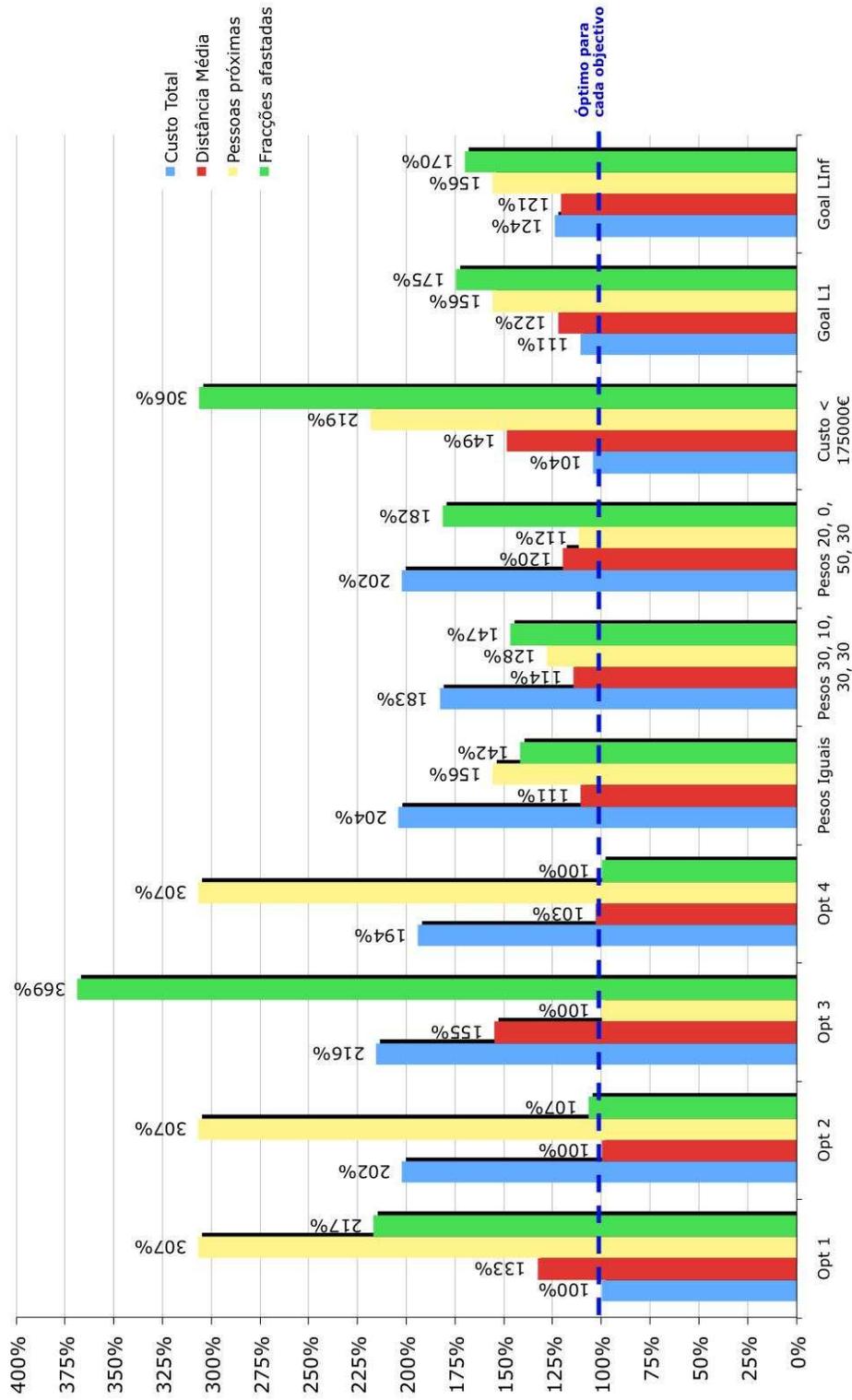


Figura A.7: Comparação das 10 soluções para a instância "TODOS"

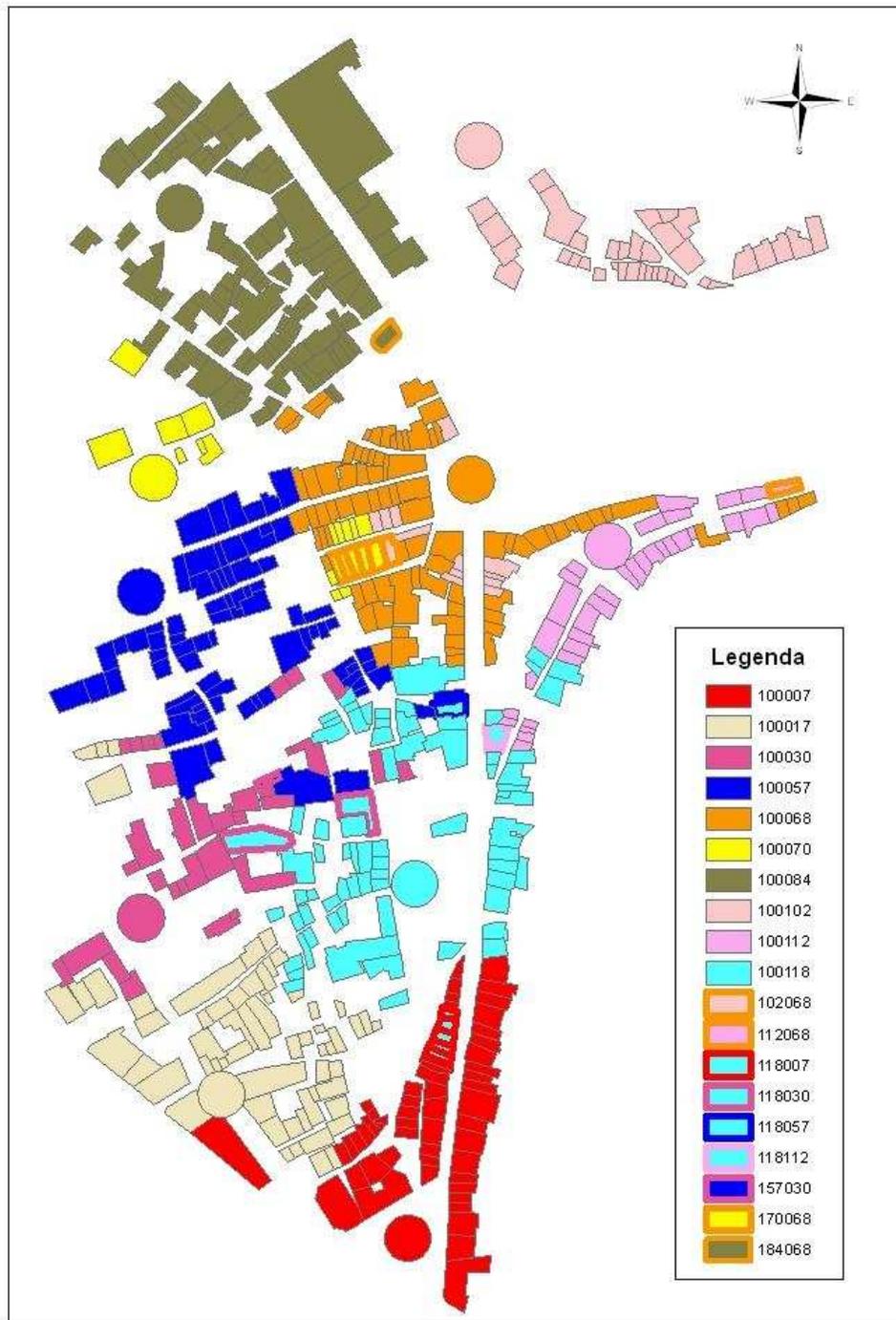


Figura A.8: Diagrama de afectações de edifícios, para a solução "Goal L1" da instância "TODOS"

Dimensionamento e Localização de Ecopontos para a Baixa de Coimbra  
com Metodologia Multicritério e Tecnologia SIG

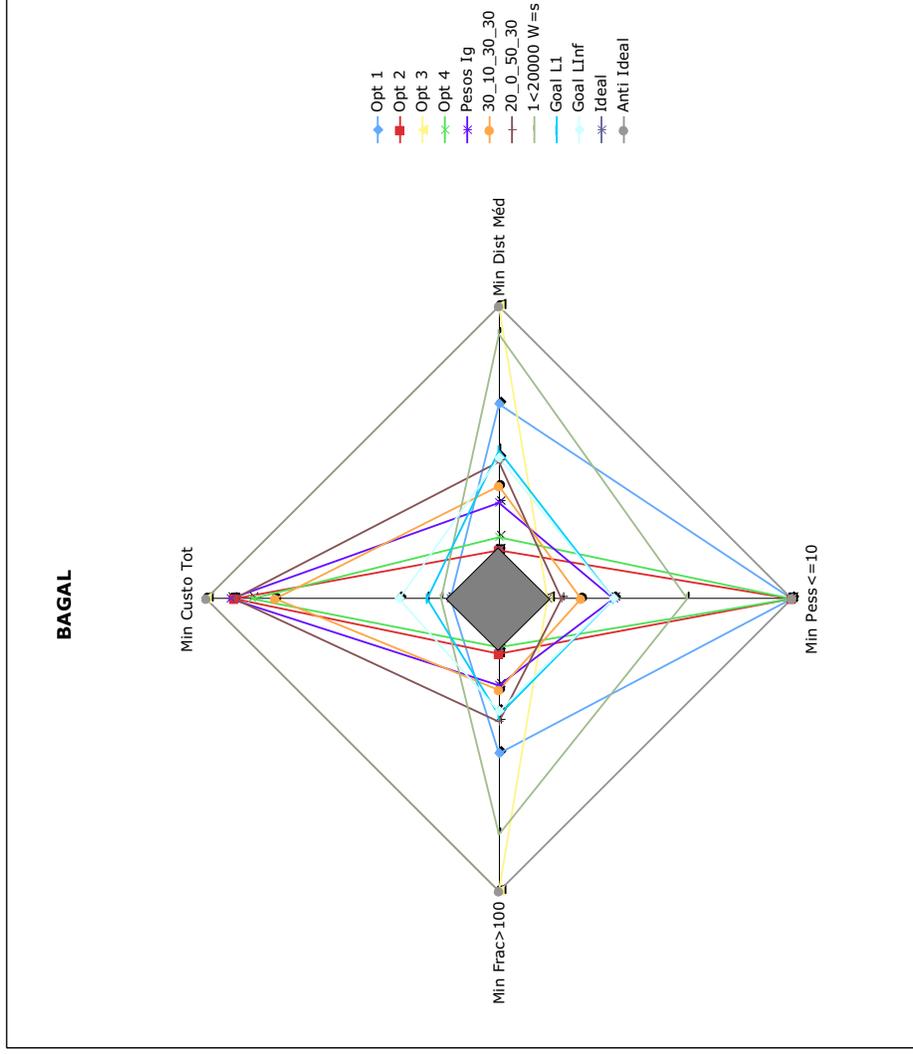


Figura A.9: BAGAL para a instância "TODOS".

Dimensionamento e Localização de Ecopontos para a Baixa de Coimbra  
com Metodologia Multicritério e Tecnologia SIG

Objectivos Soluções	Custo Total		Distância Média		Pessoas Próximas		Fracções Afastadas		L1	L2	Linf
	€	Δ1 %	m/fracção	Δ2 %	nº	Δ3 %	nº	Δ4 %			
<b>Opt 1</b>	90 180.00	+0.00%	112.3	+64.06%	251	+206.10%	1276	+239.36%	509.52%	322.29%	+239.36%
<b>Opt 2</b>	129 380.00	+43.47%	68.4	+0.00%	251	+206.10%	414	+10.11%	259.67%	210.87%	+206.10%
<b>Opt 3</b>	115 890.00	+28.51%	86.8	+26.91%	82	+0.00%	814	+116.49%	171.91%	122.91%	+116.49%
<b>Opt 4</b>	113 190.00	+25.52%	71.4	+4.30%	251	+206.10%	376	+0.00%	235.92%	207.72%	+206.10%
<b>Pesos Iguais</b>	127 170.00	+41.02%	74.0	+8.19%	144	+75.61%	453	+20.48%	145.30%	88.80%	+75.61%
<b>Pesos 30, 10, 30, 30</b>	121 410.00	+34.63%	81.8	+19.57%	84	+2.44%	692	+84.04%	140.69%	93.01%	+84.04%
<b>Pesos 20, 0, 50, 30</b>	121 410.00	+34.63%	81.8	+19.57%	84	+2.44%	692	+84.04%	140.69%	93.01%	+84.04%
<b>Custo &lt; 100 000</b>	98 620.00	+9.36%	111.9	+63.55%	156	+90.24%	1275	+239.10%	402.25%	263.51%	+239.10%
<b>Goal L1</b>	111 900.00	+24.09%	78.7	+15.02%	121	+47.56%	575	+52.93%	139.59%	76.61%	+52.93%
<b>Goal Linf</b>	111 900.00	+24.09%	78.7	+15.02%	121	+47.56%	575	+52.93%	139.59%	76.61%	+52.93%
<b>Ideal</b>	90 180.00	+0.00%	68.4	+0.00%	82	+0.00%	376	+0.00%	0.00%	0.00%	+0.00%
<b>Nadir</b>	129 380.00	+43.47%	112.3	+64.06%	251	+206.10%	1276	+239.36%	552.99%	325.21%	+239.36%

Figura A.10: Quadro": Quadro dos Resultados para a instância "RENOVAÇÃO"

Dimensionamento e Localização de Ecopontos para a Baixa de Coimbra  
com Metodologia Multicritério e Tecnologia SIG

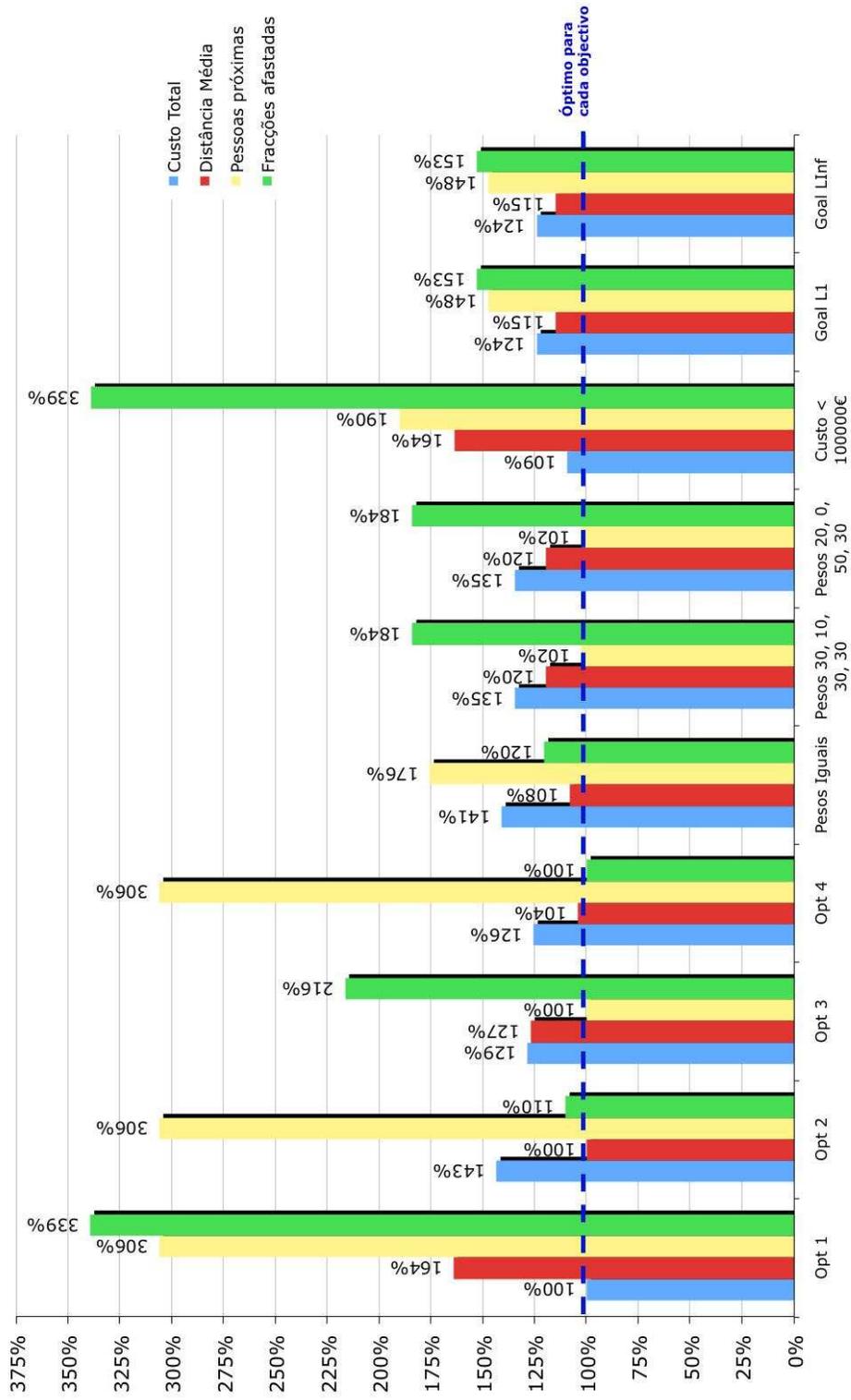
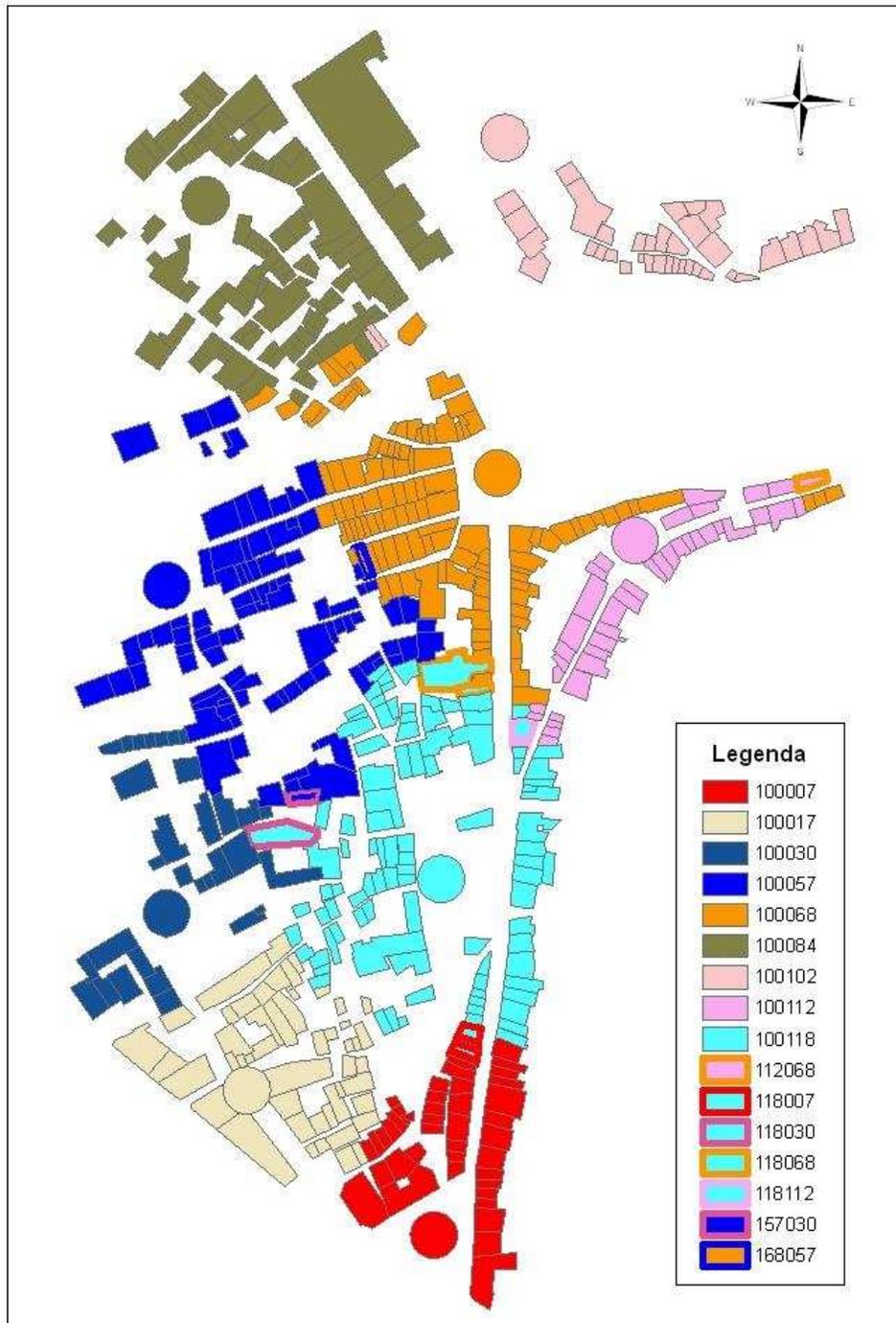


Figura A.11: Comparação das 10 soluções para a instância "RENOVAÇÃO"



**Figura A.12: Diagrama de afetações de edifícios, para a solução "Goal Linf" da instância "RENOVAÇÃO"**

Dimensionamento e Localização de Eopontos para a Baixa de Coimbra  
com Metodologia Multicritério e Tecnologia SIG

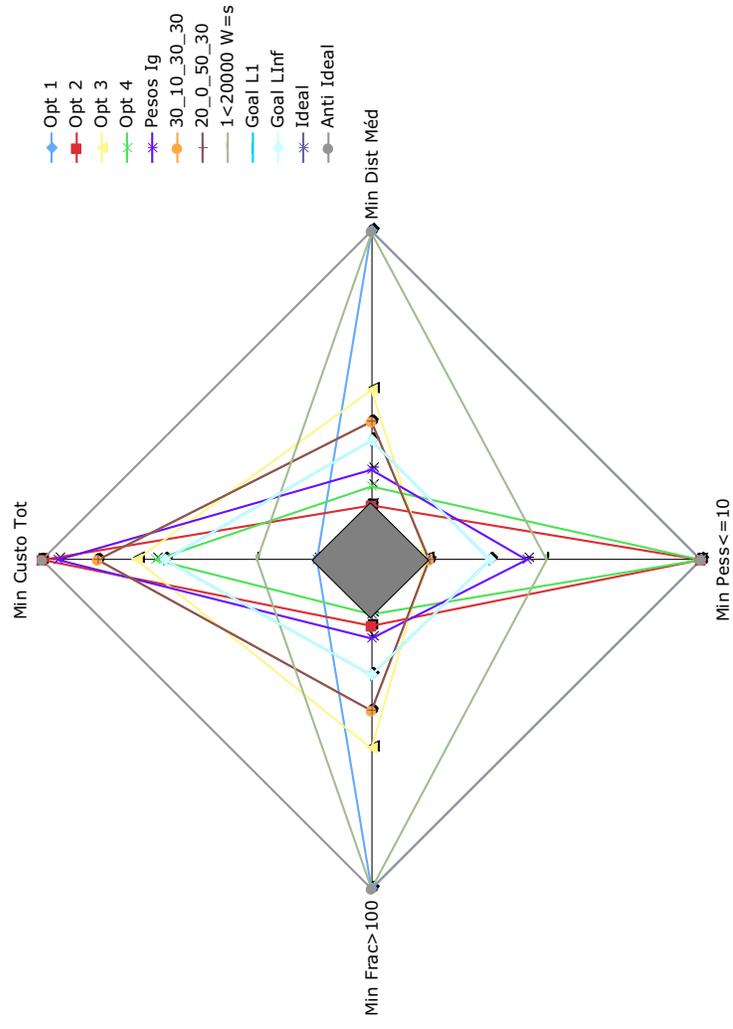


Figura A.13: BAGAL para a instância "RENOVAÇÃO"

## **BIBLIOGRAFIA**

Alçada-Almeida L., (2003): "Computadores e Tecnologias da Informação – Uma Introdução ao Mundo Digital". Ed. IDTec, Cap. IV, pp. 115-117.

Alçada-Almeida L., (2006): "Apoio à Decisão em SIG – Aplicações em Engenharia Urbana e Estudo de Impactes Ambientais". Tese de Doutoramento, FEUC.

Alçada-Almeida L., Tralhão M.L., Santos L., Coutinho-Rodrigues J., (2008): "A Multiobjective Approach to Locate Emergency Shelters and Identify Evacuation Routes for Emergencies in Urban Areas", *Geographical Analysis*, special issue in memory of C. ReVelle, aceite para publicação em 2008.

Almeida J. P., (1997): "Previsão de Impactes Ambientais: Implementação de um Modelo Gaussiano e sua Ligação a um Sistema de Informação Geográfica", Dissertação de Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Especialização em Engenharia Urbana, pp. 17.

Ayeni B., (1997): "The Design of Spatial Decision Support Systems in Urban and Regional Planning", *Decision Support Systems in Urban Planning*. Ed. Harry Timmermans.

Burrough P. A., McDonnell R. A., (2000): "Principles of Geographical Information Systems", Oxford University Press.

Cappanera P., Gallo G., (2004): "Discrete facility location and routing of obnoxious activities", *Discrete Applied Mathematics*, 133, 3-28.

Carrizosa E., Plastria F., (1999): "Location of Semi-Obnoxious Facilities", *Studies in Location Analysis*, Issue 12, pp. 1-27.

Clarke K. C. (1986): "Recent trends in Geographic Information Systems". *Geo-processing*, 3, 1-15.

Codd E. F. (1970): "A relational model of data for large shared data banks". *Communications of the Association for Computing Machinery* 13 (6), 377-87.

Codd E.F. (1979): "Extending the database relational model to capture more meaning". *Association for Computing Machinery Transactions on Database Systems* 4 (4), 397-434.

Coppock J. T., Rhind D. W. (1991): "The History of GIS" In: Maguire D. J., Goodchild M. F., Rhind D. W. (eds.) *Geographical Information Systems: Principles and applications*. Longman, London, vol 1, pp. 21-43.

COM, 1996: "A Review of the Community Strategy for Waste Management", Commission of the European Communities, Brussels.

Coutinho-Rodrigues, J., Clímaco J., Current J, Ratick, S., (1997): "An Interactive Spatial Decision Support System for Multiobjective HAZMAT Location-Routing Problems", *Transportation Research Record*, 1602, 101-109.

Coutinho-Rodrigues, J., (2003): "Gestão de Empreendimentos - A Componente de Gestão da Engenharia", Ed. IDTec, Coimbra (Cap VII - Avaliação Multidimensional).

Coutinho-Rodrigues, J., (2004): "Avaliação Multidimensional em Engenharia e Planeamento", Lição de Síntese, Provas de Agregação, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra,

Coutinho-Rodrigues, J. (2007): "Aplicações de Teoria de Sistemas - Uma Introdução a Técnicas de Investigação Operacional", Ediliber, 5ª Edição.

Daskin M.S., (1995): "Network and Discrete Location, Models, Algorithms and Applications" Wiley-Interscience series in Discrete Mathematics and Optimization.

Denshaw P. J., Armstrong M. (1987): "A spatial decision support system for locational planning: design, implementation and operation" Proceedings of AUTOCARTO 8. ASPRS, Falls Church Virginia, pp. 112-21.

Eiselt H. A., Laport G., (1995): "Objectives in Location Problems" in Facility Location – A Survey of Applications and Methods, editado por Z. Drezener, Springer series in Operations Research, pp 151-180.

Erkut E., Neuman S., (1989): "Analytical Models for Locating Undesirable Facilities", European Journal of Operations Research, 40, 209-227.

Frank A.U., Mark D, M., (1991): "Language issues for GIS". In: Maguire D.J., Goodchil M.F., Rhind D.W. (eds.), Geographical Information Systems: Principles and applications. Longman, London.

Geoffrion A. M., (1983): "Can OR/MS evolve fast enough?" Interfaces 13: 10-25.

Goulart, A., 2003: "Comparison of Deep Collection System with Traditional Systems", MSc Thesis, Aveiro University.

Hakimi, S. L., (1965): "Optimum Distribution of Switching Centers in a Communication Network and Some Related Graph Theoretic Problems", Operations Research, 13, 462-475.

Himeno. S, Kondo A., Zhou K., Wada T., (2004): "Evaluation of Public Service Facilities Based on Satisfactory Distance", Chengdu City, Sichuan, China, Infrastructure Planning Review, JSCE, Nº 21-1, 239-246.

Herring J.R., (1987): "TIGRIS: Topologically integrated geographic information system". Proceedings of AUTOCARTO 8. ASPRS/ACSM, Falls Church, pp. 282-91.

Jackson M. J., Woodsford P.A. (1991): "GIS data capture hardware and software". D. J. Maguire, M. F. Goodchild e D. W. Rhind (eds.), Geographical Information Systems, I: Principles. Longman Scientific and Technical, Harlow, pp. 239-49.

Johns Hopkins Magazine, (April 1997): "Science & Technology, What is Location Science?". Baltimore.

Keen P. G. W. (1980): "Adaptive design for decision support systems" Data Base 12: 15-25.

Konecny G. (1988): "Keynote address - Current Status of Geographic and Land Information Systems" Proceedings of AM/FM European Conference IV, Montreux.

Longley P.A, Goodchild M.F., Maguire D. J., Rhind D.W, (2000): "Geographical Information Systems and Science", John Wiley & Sons, Lda.

Maguire David J., 1991: "Na Overview of GIS". In Geographical Information Systems: Principals and Applications (D. J. Maguire, M. F. Goodchild e D. W. Rhind, eds.), vol. 1, 1, pp. 9-20. Longman Scientific & Technical, London.

Maguire D. J., Dangermont J. (1991): "The functionality of GIS". In: Maguire D. J., Goodchild M. F., Rhind D. W. (eds.) Geographical Information Systems: principles and applications. Longman, London pp. 319-35, vol 1.

Maguire D.J., Raper J. F. (1990): "An Overview of GIS functionality". Proceedings of GIS Design Models and Functionality Conference. Midlands Regional Research Laboratory, Leicester, 10 pp.

Marble D.F., (1984):" Geographic Information Systems: an overview", Proceedings of Pecora 9 Conference, pp. 18-24. Diuox Falls, SD.

Mendes José (1995): "Apontamentos de Sistemas de Informação Urbanística". Mestrado em Engenharia Urbana, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Murteira, B., 1990: "Probabilidades e Estatística" Vol. 1, 2ª Edição, McGraw\_Hill.

NRGEU, (2005): Novo Regulamento Geral de Edificações Urbanas, RGEU. Versão provisória da CSOPT - Subcomissão para revisão do RGEU.

Oliveira, T., 1991: "Probabilidades e Estatística, Conceitos, Métodos e Aplicações", Vol. II,

Cap. XIV, McGraw-Hill.

PAMRSU, 2004: "Plano de Acção Municipal sobre resíduos Sólidos Urbanos – 2004-2016 – Câmara Municipal de Coimbra.

Paredes E. A., (1994): "Sistemas de Informação Geográfica", São Paulo, Érica, ISBN:85-7194-231-5

Pássaro, D. A., (2002): "Waste management in Portugal between 1996 and 2002", "Waste Management", 23 (2003), 97-99.

Peckham, R., (1997): "Geographical Information System Systems and Decision Support for environmental management". Decision Support Systems in Urban Planning. Ed. Harry Timmermans.

Peuquet D.J., (1984): "A conceptual framework and comparison of comparison of spatial data models". Cartographica 21, 66-113.

Revelle C., Swain R.W., (1970): "Central Facilities Location". Geographical Analysis, 2, pp. 30-42.

Steuer R., (1986): "Multiple criteria optimization: theory, computation and application". John Wiley and Sons.

Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S.A. (1993): "Integrated Solid Waste Management". Singapura.

Tralhão L.T., Alçada-Almeida, Coutinho-Rodrigues, J., (2008): "Um Modelo Multiobjectivo

para a Localização de EcoPontos em Meio Urbano”. Research Report. INESC-Coimbra. (em preparação).

Tomlin C.D., (1983): “A map Algebra”. Harvard Computer Graphics Conference 1983. Harvard University Graduate School Analysis. Cambridge, Massachusetts.

Tomlinson R. F. (1985): “Geographic Information Systems – the new frontier”. The Operational Geographer, 5, 31-6.

Yoshitaka A., Akio K. (1986): “The Optimal distance between residential locating and urban facility”. Journal of the City Planning Institute of Japan, 21, 295-300.

Zeleny, M., (1982): “Multiple Criteria Decision Making”. McGraw-Hill Book Company, New York. ISBN: 0070727953.

Zhou K., Kondo A., Wada T., Watanabe, K., (2005): “Allocation Problem of Garbage Containers Based on Residential Awareness: The Case Study in Tokushima”, Japan.