

**Localização de Ambulâncias:  
Uma aplicação para a cidade de São José dos Campos – SP**

Ana Paula Silva Figueiredo  
Luiz Antonio Nogueira Lorena

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{anapaula, lorena}@lac.inpe.br

**Abstract:** This work presents the TEAM ambulance location model and a Constructive Genetic Algorithm to solve it. It is also presented a toy-model with the demand points, ambulance possible bases, the distance between them and the feasible solutions found by the CGA.

**Palavras-chave:** localização de ambulâncias, TEAM, algoritmo genético construtivo, ambulance location, constructive genetic algorithm

## 1. Introdução

A localização de ambulâncias tem sido tratada por métodos de otimização (Toregas et al. 1971; Shilling et al. 1979; Hogan e ReVelle, 1986; Daskin, 1987; Swersey, 1994; Marianov e ReVelle, 1995; Gendreau et al., 1997; Brotcorne et al., 2003) entre outros. O objetivo destes trabalhos tem sido o de encontrar uma configuração espacial da localização das ambulâncias que melhor forneça cobertura às demandas. Esta cobertura se refere à medida da habilidade do sistema em levar a ambulância em um tempo ou distância máxima pré-definida ao local onde se encontra a emergência e o de transportar aquele que sofre a emergência ao local de atendimento. O uso de distância ou tempo padrão nas formulações de localização de modelos remonta ao trabalho de Toregas et al. (1971) no qual um limite superior do tempo, ou da distância, havia sido pré-definido e desejava-se encontrar a localização das facilidades que apresentasse menor custo. Este arranjo deveria ser tal que todos os usuários da região deveriam ser atendidos adequadamente dentro daquele padrão. No caso dos custos de se implantar cada uma das facilidades fosse o mesmo, o problema passava a ser o de encontrar o menor número de facilidades necessárias para atender cada usuário dentro do tempo ou distância padrão. Este modelo é conhecido como Modelo de Localização por Cobertura de Conjuntos (LSCM). Porém o LSCM ignora alguns aspectos da realidade, dentre eles a situação de que, uma vez que a ambulância esteja atendendo a um chamado, a área pela qual era responsável estaria descoberta.

O modelo apresentado por Church e ReVelle (1974) previa então uma restrição, diga-se orçamentária, no número de ambulâncias, representando uma quantidade menor do que aquela encontrada com o LSCM. Assim o objetivo passava a ser o de maximizar a demanda coberta dentro de um padrão de tempo ou distância pré-estabelecida, com um número estabelecido de ambulâncias. Este modelo é conhecido como Problema de Localização com Máxima Cobertura (MCLP).

O LSCM pode ser utilizado como uma ferramenta de planejamento para estabelecer qual deveria ser o número mínimo de ambulâncias necessárias para prover um serviço de qualidade para toda a demanda, pelo menos em termos de cobertura. O modelo MCLP também é uma ferramenta de planejamento que proporciona ao administrador que tem restrições orçamentárias informações sobre onde localizar as ambulâncias de modo a fazer o melhor, em termos de cobertura, com os recursos disponíveis.

Estes são modelos determinísticos de localização de ambulâncias e são usados no estágio de planejamento do sistema, ignorando as considerações estocásticas relacionadas à disponibilidade das ambulâncias. Para resolver o problema de que a demanda estará descoberta quando uma ambulância estiver atendendo a um chamado, foram propostos modelos de cobertura extra.

Os modelos de cobertura extra tentam garantir que a demanda seja coberta por outra ambulância, que não a sua primária, a fim de garantir o atendimento quando esta estiver ocupada. Dentre os modelos de cobertura extra, Shilling et al. (1979) propuseram um modelo que contemplava o trabalho conjunto de dois tipos de veículos para o atendimento do chamado. Este modelo, chamado TEAM (Tandem Equipment Allocation Model), maximiza a demanda coberta por dois tipos de veículos diferentes cujos padrões de cobertura são diferentes e se encontram também em quantidade diferentes. A demanda será dita coberta se estiver coberta por ambos os tipos de veículos. Em termos de sistemas de emergências médicas pode-se considerar ambulâncias de suporte básico e avançado, por exemplo.

## **2. O Sistema de atendimento móvel de urgência no Brasil**

No Brasil o Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU) é a forma pela qual o Ministério da Saúde implementa a assistência pré-hospitalar no âmbito do SUS (Sistema Único de Saúde). O Ministério da Saúde implanta o Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU) com recursos destinados à compra de ambulâncias, equipamentos para Centrais de Regulação Médica de Urgências e para implantação dos Núcleos de Educação em Urgência. As ambulâncias são adquiridas na proporção de um veículo de suporte básico à vida para cada grupo de 100.000 a 150.000 habitantes, e de um veículo de suporte avançado à vida para cada 400.000 a 450.000 habitantes.

No aspecto do transporte das vítimas, o SAMU atende a população com dois tipos de veículos, denominados tipos B e D. Cada uma destas ambulâncias tem capacidade de suprir determinadas urgências. A ambulância do tipo B é a Ambulância de Suporte Básico, um veículo destinado ao transporte inter-hospitalar de pacientes com risco de vida conhecido e ao atendimento pré-hospitalar de pacientes com risco de vida desconhecido, não classificado com potencial de necessitar de intervenção médica no local e/ou durante o transporte até o hospital. A ambulância do tipo D, ou Ambulância de Suporte Avançado é um veículo destinado ao atendimento e transporte de pacientes de alto risco em emergências pré-hospitalares e/ou de transporte inter-hospitalar que necessitam de cuidados médicos intensivos.

Uma vez que no Brasil o Sistema de Atendimento Móvel de Urgência contempla dois tipos diferentes de unidades de atendimento propõe-se utilizar o modelo TEAM para estabelecer a localização destes veículos.

## **3. TEAM – Modelo de Localização com Equipamentos que Trabalham em Conjunto**

O modelo TEAM (Tandem Equipment Allocation Model) apresentado por Schilling et al. (1979) foi utilizado originalmente para localizar dois tipos de veículos para combate a incêndios, porém no contexto da localização de ambulâncias pode ser utilizado para a localização de ambulâncias BLS (Basic Life Support) e ALS (Advanced Life Support). Os serviços de emergência normalmente trabalham com dois tipos de veículos com diferentes habilidades, um que fornece o serviço básico e o outro com atendimento avançado. Ambos podem ser despachados para o local da chamada, porém com tempos padrão diferentes.

### 3.1 O modelo TEAM

Denotando por  $p^A$  e  $p^B$  o número de veículos disponíveis do tipo A (básico) e B (avançado) e  $r^A$  e  $r^B$  os padrões de cobertura para cada tipo de veículo, a formulação do modelo é :

$$(TEAM) \quad Max \sum_{i \in V} d_i y_i \quad (3.1)$$

$$\sum_{j \in W_i^A} x_j^A \geq y_i \quad (i \in V) \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in W_i^B} x_j^B \geq y_i \quad (i \in V) \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in W} x_j^A = p^A \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in W} x_j^B = p^B \quad (3.5)$$

$$x_j^A \leq x_j^B \quad (j \in W) \quad (3.6)$$

$$x_j^A, x_j^B \in \{0,1\} \quad (j \in W) \quad (3.7)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad (i \in V) \quad (3.8)$$

A equação (3.1) estabelece o objetivo de maximizar a demanda ( $d_i$ ) coberta. As inequações (3.2) e (3.3) estabelecem que a demanda só estará coberta se for atendida por ambos os tipos de ambulâncias, ou seja não basta ser coberta apenas por um dos tipos de ambulâncias é preciso estar coberta pelos dois tipos. As equações (3.4) e (3.5) estabelecem o número de ambulâncias disponíveis dos tipos básico e avançado, respectivamente. A equação (3.6) estabelece a hierarquia entre os tipos de ambulâncias, ou seja, não é possível cobrir a demanda com um tipo avançado sem que ela já esteja coberta com um tipo básico. A equações (3.7) e (3.8) expressam as condições de integralidade e não negatividade onde as variáveis  $x_j^A$ ,  $x_j^B$  serão iguais a 1 se a ambulância do tipo A ou do tipo B estiver localizada no local  $j$ , caso contrário  $x_j^A = 0$  e  $x_j^B = 0$ . As variáveis  $y_i$  serão iguais a 1 quando a demanda  $i$  estiver coberta por ambos os tipos de ambulâncias.  $W_i^A$  e  $W_i^B$  são os conjuntos de localizações possíveis para as ambulâncias que atendem a demanda dentro dos padrões  $r^A$  e  $r^B$ , ou seja

$$W_i^A = \{j \in W : t_{ij} \leq r^A\}$$

$$W_i^B = \{j \in W : t_{ij} \leq r^B\}$$

onde  $t_{ij}$  é o tempo, ou distância, entre a localização  $i$  e o local de demanda  $j$  e deve ser conhecido previamente.

A solução para o problema será a de encontrar os locais para se localizar as  $p^A$  e  $p^B$  ambulâncias dos tipos A e B disponíveis de modo a maximizar a demanda coberta por ambas, ou seja a solução será do tipo

$$x_1^A = 1, x_2^A = 1, \dots, x_j^A = 0, x_1^B = 0, x_2^B = 1, \dots, x_j^B = 0 \text{ e } y_1 = 1, y_2 = 0, y_3 = 1, y_4 = 0, y_5 = 1, \dots, y_i = 0.$$

#### 4. O Algoritmo Genético Construtivo na solução do modelo de localização TEAM

O Algoritmo Genético Construtivo (AGC), apresentado por Lorena e Furtado (2001), inicia com uma população de esquemas que carregam informações sobre propriedades estruturais do problema. Estes esquemas são avaliados e os melhores são incentivados a se recombinarem de tal forma que, através de sucessivas gerações, novos esquemas ou estruturas completas sejam produzidas. OAGC utiliza duas funções,  $f$  e  $g$ , para avaliar as estruturas. Cada qual é avaliada por um rank  $\delta$  que avalia quão bem adaptado está. Considerando a representação dos esquemas, o valor da avaliação- $fg$  aumenta com a diminuição do número de símbolos #, ou seja, quanto mais completa a estrutura, em geral terá valor da avaliação- $fg$  maior do que a avaliação dos esquemas.

O AGC pode ser modelado como um problema de otimização com dois objetivos (POB).

$$(POB) \quad \min \quad \{g(S_k) - f(S_k)\} \quad (4.1)$$

$$\max \quad g(S_k) \quad (4.2)$$

$$\text{sujeito a } g(S_k) \geq f(S_k), S_k \in X. \quad (4.3)$$

A população inicial, denominada  $P_0$ , é formada por esquemas gerados aleatoriamente, mantendo as mesmas características do algoritmo genético tradicional, ou seja de representar o problema de maneira que os esquemas iniciais permitam que todas as informações estruturais do problema sejam abrangidas.

O tamanho inicial da população deve considerar o tamanho do problema, ou seja o número de demandas a serem cobertas na região, bem como o número de ambulâncias disponíveis. Esta população inicial deverá prover diversidade suficiente para o processo evolutivo.

#### 4.2 Representação dos indivíduos para o modelo TEAM

Os indivíduos são criados com uma estrutura que contemple um vetor  $x_A$  e um vetor  $x_B$  com dimensões iguais ao número  $m$  de locais possíveis para a localização das ambulâncias:

$x_A$  [ \_ \_ \_ \_ \_ ] com  $m$  posições e

$x_B$  [ \_ \_ \_ \_ \_ ] com  $m$  posições.

Cada indivíduo deve ser avaliado em sua capacidade de atender as restrições (3.2) a (3.8). Segundo Figueiredo et al (2004) foram criados coeficientes representando cada conjunto daquelas restrições de modo a penalizar os indivíduos que não as cumprem Além disto as regras de recombinação entre estruturas escolhidas levam em consideração quão adaptado está a estrutura, o que é obtido através de seu rank  $\delta$ . Dentre os melhores adaptados escolhe-se a estrutura dita Base e em toda a população a estrutura dita Guia. Ambas são emparelhadas e cria-se a estrutura Nova que tende a ser melhor que a Base. Desta forma melhores indivíduos são criados a cada recombinação. A cada geração o melhor indivíduo terá melhores coeficientes de penalidade representando soluções para o problema. O que se deseja é encontrar soluções cada vez melhores em termos de cobertura.

#### 5. Localização de ambulâncias em São José dos Campos - SP. Um exemplo reduzido.

Uma vez estabelecido o modelo TEAM de localização de ambulâncias para o SAMU, o que contempla as ambulâncias do tipo básico é avançado, faz-se necessário encontrar as possíveis bases de localização e os centros de demanda.

Para as bases de localização podem ser estabelecidos locais como as Unidades Básicas de Saúde, hospitais ou mesmo estacionamentos de ambientes comerciais, dentre outros. Já os centros de demanda devem contemplar o adensamento populacional, ou seja, há duas abordagens que podem ser utilizadas para se estabelecê-las. A primeira é a de que um certo número fixo de pessoas residentes representam um centro de demanda, fixado por exemplo, no centro geométrico deste adensamento. O outro de que este centro representa uma área territorial fixa, independente do número de pessoas. Há de se lembrar que o modelo TEAM contempla esta situação, ou seja de que cada centro pode ter um peso diferente, neste caso, o número de pessoas residentes.

É apresentado a seguir um exemplo criado com o objetivo de aplicar o modelo TEAM e o AGC. Neste exemplo são consideradas disponíveis três ambulâncias de atendimento básico e duas de atendimento avançado. A primeira com uma distância padrão de 9000 m e a segunda de 11000 m.

Para cada Base onde é possível localizar uma ambulância, no exemplo em número de 10, é necessário encontrar a melhor rota até cada centro de demanda, no exemplo em número de 25. Cria-se então a matriz de distâncias, como vista na **Tabela 1**, em parte.

	D1	D2	D3	D4	...	D20	D21	D22	D23	D24	D25
<b>B1</b>	744	17267	16364	19850	...	14341	11669	17014	16777	18948	21947
<b>B2</b>	11090	5923	5249	8735	...	7101	4532	9877	9641	11812	14811
<b>B3</b>	15879	3758	418	9448	...	11889	9321	14666	14429	16600	19599
<b>B4</b>	15879	3758	418	9448	...	11889	9321	14666	14429	16600	19599
<b>B5</b>	15879	3758	418	9448	...	11889	9321	14666	14429	16600	19599
<b>B6</b>	20738	19650	18746	22232	...	10188	11383	14212	13976	16117	14109
<b>B7</b>	19398	18335	17431	20917	...	6577	9259	9369	9132	11167	8797
<b>B8</b>	15892	14828	13925	17411	...	3071	5764	5874	5637	7672	5633
<b>B9</b>	13326	12367	11463	14949	...	1465	2402	3537	3300	5441	7948
<b>B10</b>	16465	15506	14603	18089	...	4782	5590	2540	1287	2378	10448

Tabela 1 – Matriz de Distâncias, em metros, entre as bases e os centros de demanda

Para se calcular estas distâncias foi utilizado a extensão de análise de redes do software ArcView e um script escrito na linguagem Avenue. O resultado destas rotas de melhor caminho pode ser visto na **Figura 1**.

A partir dessa matriz de distâncias foi executado o AGC, que encontrou 8 soluções ótimas distintas, todas elas cobrindo 84% da demanda (**Tabela 2**).

xA[ ]	xB[ ]	%
0100001001	0100001000	11
0100001010	0100001000	14
0100001100	0100000100	8
0100001100	0100001000	14
0100010001	0100010000	14
0100010010	0100010000	12
0100010100	0100000100	15
0100010100	0100010000	12

Tabela 2 – Soluções diferentes, com o mesmo valor ótimo.

O mesmo problema foi resolvido com o software CPLEX, que encontrou uma única solução, que coincide com uma das oito soluções encontradas pelo AGC. A **Figura 2** mostra o sistema de localização obtido com essa solução, codificada como [010010010 0100010000], o que corresponde a localizar as três ambulâncias de atendimento básico nas bases 2, 5 e 8 e

as duas ambulâncias de atendimento avançado nas bases 2 e 6. A **Figura 2** mostra também que com esta localização ótima não é possível cobrir os centros de demandas 1, 11, 24 e 25.

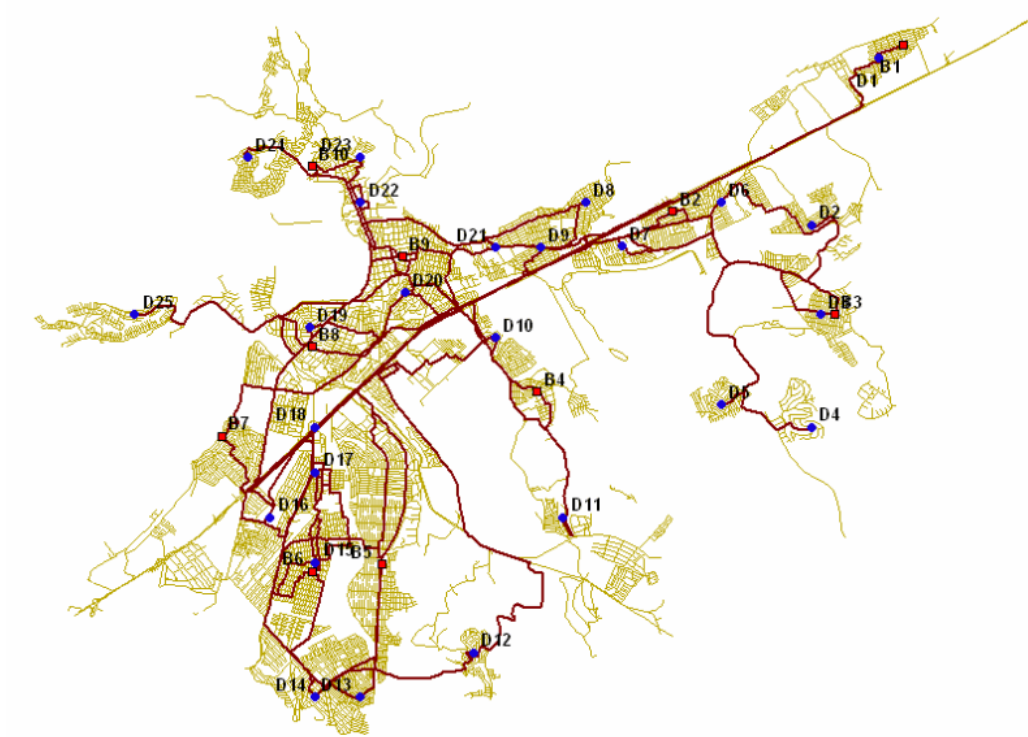


Figura 1- Rotas entre as Bases e os centros de Demanda

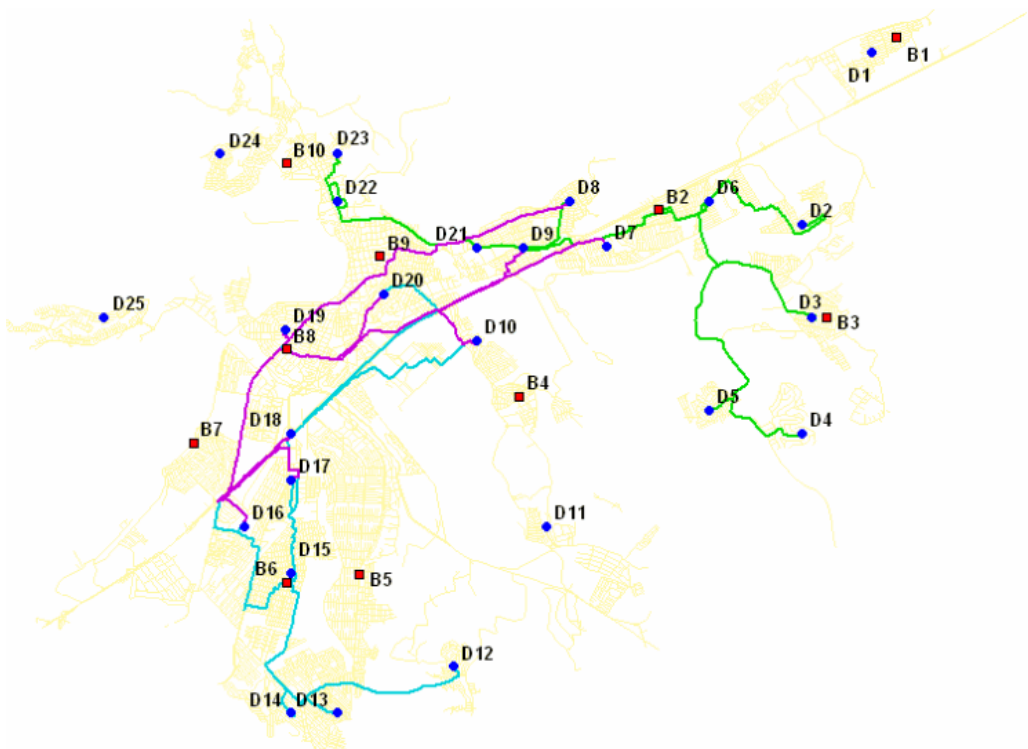


Figura 2 – Localização das ambulâncias – Solução 0100110100 0100010000

A possibilidade de encontrar múltiplas soluções com o mesmo valor ótimo permite ao analista opções de decisão quanto ao sistema de localização a ser adotado considerando outras características que durante a modelagem porventura não tenham sido consideradas.

Além disto, com o uso do AGC, as soluções encontradas que não sejam a ótima podem ser utilizadas para a construção de uma análise de compromisso entre a cobertura obtida pela solução e uma medida de desempenho do sistema, como por exemplo a carga de trabalho da ambulância. Estas medidas de desempenho fazem parte da etapa seguinte a este trabalho e utilizarão o Modelo Hipercubo (Larson e Odoni 1981), já que o sistema de ambulâncias pode ser visto como um sistema de filas com clientes espacialmente distribuídos e servidores móveis estacionados em lugares fixos. Os servidores se deslocam até o local de demanda para prestar atendimento, modelo no qual se ajusta o serviço prestado pelas ambulâncias.

A solução do modelo hipercubo é o conjunto de probabilidades associadas aos estados do sistema. Assim é possível calcular a probabilidade de todas as ambulâncias estarem atendendo, ou mesmo do sistema estar livre, passando por todos os estados possíveis do sistema. Uma vez conhecidas estas probabilidades pode-se então calcular algumas medidas de desempenho do sistema, dentre elas a carga de trabalhos das ambulâncias, os tempos de viagem e a frequência de despachos, entre outras.

## 6. Conclusões

A utilização do AGC permite encontrar a solução para o problema de localização de ambulâncias pelo modelo TEAM que contempla dois tipos diferentes de veículos, tal qual é realidade no Brasil, através do SAMU.

Alguns outros resultados estão sendo analisados para a cidade de São José dos Campos, utilizando instâncias maiores e que contemplem características reais de instalação do serviço.

As soluções viáveis encontradas através do AGC serão usadas posteriormente em um Modelo Hipercubo para algumas análises das medidas de desempenho do sistema, dentre elas o tempo médio na fila, a carga de trabalho de cada ambulância, o tempo médio de viagem e o tempo médio de resposta ao chamado de cada ambulância.

## Referências

- Brotcorne, L. Laporte, G. e Semet, F. Ambulance Location and relocation models. **European Journal of Operations Research**, v. 147, n. , p. 451-463, Jun. 2003.
- Church, R.L. e ReVelle, C. The maximal covering location problem. **Papers of the Regional Science Association** 32,101-118, 1974
- Daskin, M. S. Location, Dispatching, and Routing Models for Emergency services with Stochastic Travel Times. In: **Spatial Analysis and Location - Allocation Models**. New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1987. v. , Cap. 9, p. 224-265
- Figueiredo, A. P. S., Lorena, L. A. N. e Carvalho, S. V. Localização de Ambulâncias pelo Modelo TEAM – Solução Através do Algoritmo Genético Construtivo. In: IV Worcap – Workshop dos Cursos de Computação do INPE, 2004. Sessão Técnica Oral. Anais. Disponível na biblioteca digital URLib: <lac.inpe.br/worcap/2004/10.06.15.47>.
- Gendrau, M., Laporte, G. e Semet, F. A Dynamic Model and Parallel Tabu Search heuristic for Real-time Ambulance Relocation. **Parallel Computing** 27,1641-1653, 2001.
- Hogan, K. ReVelle, C. Concepts and Applications of Backup Coverage. **Management Science**, v. 32, n. 11, p. 1434-1443, Nov. 1986
- <http://dtr2001.saude.gov.br/samu>
- ILOG/CPLEX 6.5. ILOG S.A. 1999.

- Larson, R. C. Odoni, A. R. **Urban Operations Research**. New Jersey: Prentice-Hall, Maio 1981. 573 p.
- Lorena, L. A. N. Furtado, J. C. Constructive Genetic Algorithm for Clustering Problems. **Evolutionary Computation**, v. 9, n. 3, p. 309-327, 2001
- Marianov, V. ReVelle, C. Siting Emergency Services. In: **Facility location - A Survey of Applications and Methods**. New York: Springer, 1995. v. , Cap. 10, p. 199-223.
- Schilling, D. Elzinga, D.J., Cohon, J., Church, R., ReVelle, C. The Team/Fleet Models for Simultaneous Facility and Equipment Siting. **Transportation Science**, v. 13, n. 2, p. 163-175, Maio 1979.
- Swersey, A. J. The Deployment of Police, Fire and Emergency Medical Units. In: **Handbook in Op. Research and Management Science**. Amsterdam: North Holland, 1994. v. 6, Cap. 6, p. 151-200.
- Toregas, C. Swain, R., ReVelle, C. e Bergman, L. The Location of Emergency Service Facilities. **Operations Research**, v. 19, n. , p. 1363-1373, 1971.