

Uma avaliação multiobjetivo de atendimentos de emergência com base na população, no número de ocorrências e na distância percorrida pelos veículos de resgate

Thayse Ferrari¹, Bruno Salezze Vieira², Marcus Vinicius Oliveira Camara³,
Glaydston Mattos Ribeiro⁴, Carlos David Nassi⁵

¹Programa de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, thayseferrari@pet.coppe.ufrj.br

²Programa de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, bruno.vieira@pet.coppe.ufrj.br

³Programa de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, marcus@pet.coppe.ufrj.br

⁴Programa de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, glaydston@pet.coppe.ufrj.br

⁵Programa de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, nassi@pet.coppe.ufrj.br

Recebido:

27 de março de 2018

Aceito para publicação:

20 de agosto de 2018

Publicado:

4 de novembro de 2018

Editor de área:

Claudio Barbieri da Cunha

Palavras-chaves:

Despacho de veículos de resgate;
Localização/alocação de facilidades;
Máxima cobertura.

Keywords:

Rescue vehicles dispatch;
Facility location;
Maximum coverage.

DOI:10.14295/transportes.v26i3.1643



RESUMO

Serviços Médicos de Emergência são considerados elementos críticos dos modernos sistemas de saúde, por precisarem assegurar que seu nível de serviço esteja adequado à população a qual servem. Neste sentido, Problemas de Localização de Facilidades têm sido aplicados com o intuito de indicar locais estratégicos para bases de despacho de ambulâncias que atendem às ocorrências de emergência. Este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação multiobjetivo de atendimentos de emergência, por meio de um modelo matemático, que considera a população atendida, o número de ocorrências e a distância percorrida pelos veículos de emergência para atendimento. Cenários são produzidos para permitir variações do tempo de resposta, do número de bases de despacho e do número de veículos disponíveis. Um estudo de caso envolvendo o município do Rio de Janeiro foi considerado para exemplificar a avaliação multiobjetivo proposta. Foram considerados cerca de 105 mil registros, entre ocorrências gerais e acidentes de trânsito.

ABSTRACT

Emergency Medical Services are considered critical elements of modern healthcare systems, because they need to ensure that the level of service is appropriate for the population served. In this sense, Facility Location Problems have been applied in order to indicate strategic locations for ambulance dispatch bases that respond to emergency calls. The objective of this study is to carry out a multiobjective evaluation of the emergency response to variations, using mathematical model, which considers the population served, the number of emergency calls and the distance travelled by the emergency vehicles. Scenarios are created to allow variations in the response time, number of dispatch bases and number of emergency vehicles available for service. A case study for the Rio de Janeiro city is presented to show our multiobjective approach. About of 105 thousands records were considered, including general and traffic accidents occurrences.

1. INTRODUÇÃO

Serviços Médicos de Emergência (EMS - sigla em inglês) são considerados elementos críticos dos modernos sistemas de saúde, uma vez que são responsáveis pelo componente pré-hospitalar, que consiste em atividades básicas de cuidados médicos e de transportes realizados a partir da recepção de uma chamada de emergência. Tal serviço é prestado à população por meio de

uma frota de ambulâncias, que pode ser gerida por diferentes atores, as quais devem ser estrategicamente posicionadas sobre a região que servem (Bélanger *et al.*, 2016).

De acordo com Kergosien *et al.* (2015), a natureza incerta das ocorrências de emergência, principalmente no que se refere ao horário de chegada e suas localizações, tende a prejudicar a operacionalização deste tipo de serviço. Além disso, diversos fatores podem atuar diretamente sobre a área de atendimento da EMS, como as variações no padrão da demanda ao longo do tempo, as mudanças no tempo de viagem ao longo do dia e da rede de transporte e mesmo a saída de veículos para atendimento de ocorrências (Bélanger *et al.*, 2016). Com isso, faz-se necessário assegurar que o nível de serviço dos EMS esteja adequado à população da região a qual servem, uma vez que dele pode depender o agravamento do estado de saúde da(s) vítima(s).

Neste contexto surgem adaptações do Problema de Localização de Facilidades (PLF) aplicadas à localização de postos de despacho de ambulâncias de resgate. De acordo com Su *et al.* (2015), vários modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para resolver este tipo de problema, a exemplo dos modelos de cobertura (Brotcorne *et al.*, 2003; Alsalloum e Rand, 2006; Knight *et al.*, 2012; Yin e Mu, 2012; Ferrari, 2017). Neste tipo de modelo busca-se o maior número possível de locais de demanda atendidos dentro de um padrão de cobertura pré-definido para uma ambulância. Assim, dado um padrão de cobertura para o serviço, que normalmente é representado pela distância ou pelo tempo de viagem, o objetivo do Problema de Localização de Máxima Cobertura, do inglês *Maximum Coverage Location Problem* (MCLP), consiste em localizar um número fixo de facilidades que forneça o serviço ao maior número possível de pontos de demanda (Yin e Mu, 2012).

Diante do exposto surgem alguns questionamentos: Como a distribuição espacial das bases de despacho de veículos de resgate influencia no atendimento à população? De que maneira a variação do tempo máximo estipulado para resposta interfere na cobertura do serviço? A inclusão de mais veículos, por si só, é capaz de aumentar a cobertura de atendimento? A partir destes questionamentos, o objetivo deste trabalho consiste em avaliar, sob a ótica da análise multiobjetivo, o atendimento de emergência prestado pelos EMS frente às variações do número de bases de despacho disponíveis, do tempo de resposta ao atendimento e do número de veículos de emergência no sistema. Esta avaliação leva em consideração a população atendida, o número de ocorrências e a distância percorrida pelos veículos de resgate.

Como estudo de caso, este trabalho considera os dados do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro (CBMERJ) referentes ao histórico de atendimentos de emergência realizados no ano de 2014 na cidade do Rio de Janeiro, que conta com cerca de 105 mil registros, entre ocorrências gerais e acidentes de trânsito. Utilizaram-se, também, dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) relativos aos indicadores demográficos.

A contribuição deste trabalho se dá, portanto, em duas principais vertentes. Primeiramente no âmbito governamental, pois permite auxiliar o planejamento estratégico dos serviços de atendimento de emergências. A segunda vertente inclui questões socioeconômicas, tendo em vista que possibilita a diminuição da gravidade das sequelas adquiridas, em função da redução do tempo de resposta, influenciando diretamente na vida dos indivíduos.

Sendo assim, este artigo está organizado da seguinte forma: o contexto da pesquisa é apresentado na Seção 2, com uma breve revisão da literatura sobre os atendimentos de emergência e os PLF. A Seção 3 expõe a metodologia do estudo, que inclui uma visão geral do método adotado, os parâmetros e a modelagem matemática do problema. O estudo de caso, com a descrição

da área de estudo e a definição dos cenários, é apresentado na Seção 4. Já na Seção 5 são expostos os resultados com a análise dos cenários. Na última seção são apresentadas as considerações finais deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E O CONTEXTO DA PESQUISA

Os EMS são sistemas de segurança pública que gerenciam a entrega de atendimento pré-hospitalar a pacientes que se encontram em condições de urgência/emergência médica. Este tipo de atendimento compreende a estabilização da condição do paciente e seu transporte a uma unidade adequada para receber os devidos cuidados. Com isso, o principal objetivo dos EMS é reduzir as taxas de mortalidade, de invalidez e o sofrimento, bem como melhorar as chances de recuperação do paciente (Maleki *et al.*, 2014; Aringhieri *et al.*, 2007).

Tal situação exige que os tomadores de decisão lidem com a difícil tarefa de localizar bases de despacho de ambulâncias para atender às ocorrências de maneira otimizada. Diariamente esses profissionais precisam superar diversos fatores de incerteza, como a frequência das chamadas, os locais das ocorrências, a capacidade disponível de veículos e equipes e a duração do tempo de viagem até o local do resgate (Kergosien *et al.*, 2015).

Diante de situações de urgência/emergência, o tempo decorrido entre uma ocorrência e a chegada de assistência ao local é um dos principais fatores que influenciam no desempenho dos EMS (Takeda *et al.*, 2007). Apesar de existirem outras medidas de desempenho que podem ser utilizadas para avaliação, o tempo de resposta é o fator mais crítico, uma vez que se o serviço não for fornecido prontamente, a vida daquela pessoa que requer cuidados médicos emergenciais é colocada em perigo (Su *et al.*, 2015).

Tendo isso em vista, diversos países e cidades estabeleceram padrões de atendimento a emergências que incluem o tempo de resposta às chamadas. Segundo Gendreau *et al.* (2001), o tempo de resposta em Montreal deve ser de até 10 minutos em 95% das ocorrências, sendo que 70% destes pedidos deve ser atendido em menos de 7 minutos. Já em Londres, 95% das solicitações deve ter resposta dentro de 14 minutos e 50% delas em até 8 minutos (Galvão *et al.*, 2005). O mesmo ocorre nos Estados Unidos, onde a Lei de EMS de 1973 estabelece que 95% das ocorrências devem ser atendidas dentro de 10 minutos em áreas urbanas e dentro de 30 minutos para áreas rurais (Ball e Lin, 1993).

No Brasil ainda não existe uma regulamentação específica que determine o tempo de atendimento pré-hospitalar, o que permite que cada estado ou município tenha liberdade para determinar suas próprias metas. No entanto, muitas vezes essas metas não conseguem ser atingidas, seja pelas longas distâncias a serem percorridas, pela falta de veículos disponíveis para atendimento ou mesmo pelo tempo perdido em congestionamentos. Tal fato destaca a importância do planejamento da localização da instalação de emergência, em especial, em dois aspectos: 1) na seleção de locais para instalação de bases de despacho; e 2) na definição do número de veículos atribuídos a cada base (Takeda *et al.*, 2007).

Tradicionalmente, os PLF de emergência lidam com decisões relacionadas aos locais que devem ser selecionados para localizar as facilidades e à capacidade de cada facilidade, frente a um número de pontos de demanda e de locais possíveis de instalação. Diante disso, a maior parte dos modelos matemáticos presentes na literatura considera que as chamadas de emergência dos PLF são geradas a partir de pontos de demanda discretos, onde os locais das facilidades são selecionados a partir de um conjunto finito de locais candidatos (Marín, 2011; ReVelle *et al.*, 2008).

A modelagem matemática do MCLP, inicialmente proposta por Church e ReVelle (1974), tem se mostrado uma importante ferramenta para os processos de planejamento e distribuição de facilidades, as quais passaram a ser realizadas otimizando os recursos limitados com o objetivo de maximizar os benefícios sociais e econômicos (Yin e Mu, 2012). Os autores partiram do princípio básico de que as facilidades não apresentavam capacidades, ou seja, um ponto de demanda seria atendido por uma facilidade desde que ele estivesse dentro do padrão de cobertura desta facilidade.

No entanto, não apenas o padrão de cobertura deve ser considerado nestes casos, é importante levar em conta, também, a capacidade das facilidades. Diante da definição de limite de capacidade de atendimento, Chung *et al.* (1983) e Current e Storbeck (1988) propuseram alterações no MCLP que garantiram que as demandas atribuídas a uma facilidade não excedessem a capacidade da mesma. Dando segmento a essa linha de pesquisa, Haghani (1996) propôs um MCLP capacitado multiobjetivo onde a demanda atendida era maximizada ao mesmo tempo em que a distância média entre as demandas descobertas (ou não atendidas) e as facilidades eram minimizadas.

Já Yin e Mu (2012) ampliaram o modelo proposto por Haghani (1996) de forma que a unidade de emergência pudesse apresentar diferentes níveis de capacidade, variando o número de veículos disponíveis, tornando o problema ainda mais condizente com a realidade. Recentemente, Ferrari (2017) seguiu essa mesma linha de pesquisa ao propor um modelo matemático que soluciona o Problema de Localização de Bases de Despacho de Veículos de Resgate. Tal modelagem tem como objetivo determinar, dentre um conjunto de bases disponíveis, quais deveriam ser utilizadas para cobrir determinada área com demanda por serviços de emergência, de forma a maximizar a população e as ocorrências cobertas e minimizar os custos de abertura de bases de ambulâncias e a distância percorrida entre a base e o ponto de demanda. Neste modelo devem ser respeitadas a capacidade dos veículos, assim como das bases que liberam esses veículos, e o tempo de resposta do sistema.

3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA MULTI OBJETIVO DE ATENDIMENTOS DE EMERGÊNCIA

3.1. Visão geral

O processo de modelagem foi dividido em três etapas e leva em consideração os dados do CBMERJ. Sendo assim, a Etapa 1 faz referência ao tratamento dos dados recebidos do CBMERJ, que inclui o georreferenciamento das ocorrências de resgate. Nesta etapa as ocorrências foram classificadas em dois tipos: Tipo 1 ou ocorrências gerais; e Tipo 2 ou ocorrências relacionadas aos acidentes de trânsito. Os pontos que representam os registros de cada uma destas ocorrências foram atribuídos ao modelo de zoneamento por setores censitários e utilizados como parâmetros de entrada do modelo matemático juntamente com outros dados demográficos.

A Etapa 2 trata da modelagem matemática em si, onde foram utilizadas as informações fornecidas pela Etapa 1 na construção de um modelo matemático multiobjetivo de programação linear inteira. Este modelo está baseado no trabalho de Ferrari (2017) e considera a quantidade de veículos pré-estabelecida, a capacidade desses veículos (em quantidade de pessoas que podem ser atendidas), a capacidade das bases (em número de pessoas no raio de cobertura) e o conjunto de locais candidatos a receber bases de despacho.

Com o modelo matemático definido, foram propostos cenários de aplicação que possibilitas-

sem uma avaliação dos resultados. Tais cenários foram utilizados na Etapa 3, na qual realizaram-se os experimentos computacionais utilizando o *software* de otimização Gurobi 7.02 (Gurobi Optimization, 2017) e o modelo matemático codificado em linguagem de programação Python. Obtidos os resultados, os mesmos foram representados graficamente com o auxílio do *software* TransCAD 5.0 (Caliper, 2008).

3.2 Conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão

Segundo Ferrari (2017), o problema de localização de postos de despacho de ambulâncias de resgate tem como objetivo determinar, dentre um conjunto de bases disponíveis, aquelas que devem ser utilizadas para cobrir uma determinada área, a qual apresenta ocorrências de urgência/emergência. Com base nesta definição, seja I o conjunto que representa todos os pontos de demanda (setores censitários) que necessitam de atendimentos; J o conjunto que representa os possíveis locais para receber bases de despacho de veículos de resgate; e $B_i \subseteq J$ um conjunto que representa todas as bases que podem atender a um ponto de demanda $i \in I$, dado um padrão de cobertura preestabelecido. Além disso, os seguintes parâmetros devem ser considerados:

- α_i – população da área de demanda $i \in I$;
- β_i – quantidade de ocorrências do Tipo 1 na área de demanda $i \in I$;
- γ_i – quantidade de ocorrências do Tipo 2 na área de demanda $i \in I$;
- $DIST_{ij}$ – distância entre um ponto de demanda $i \in I$ e uma base $j \in J$;
- P – quantidade total de ambulâncias disponíveis para serem alocadas aos pontos de despacho;
- $MAXP$ – quantidade máxima de ambulâncias que cada base pode receber;
- C – capacidade de cobertura/atendimento (em número de pessoas) de cada ambulância; e
- μ – quantidade máxima de pontos de demanda que uma base de despacho de ambulâncias pode atender.

Com isso, as variáveis de decisão utilizadas são as seguintes:

- $x_{ij} \in \{0,1\} \forall i \in I, j \in J$. Se $x_{ij} = 1$, o ponto de demanda $i \in I$ deve ser alocado à base de despacho de ambulâncias $j \in J$, caso contrário, $x_{ij} = 0$; e
- $z_j \in \mathbb{Z}^+ \forall j \in J$. Esta variável representa a quantidade de ambulâncias que deve ser alocada à base $j \in J$.

3.3 Modelo Matemático Multiobjetivo

Com base na descrição do problema de localização de postos de despacho de ambulâncias de resgate e no trabalho de Ferrari (2017), o modelo matemático multiobjetivo é apresentado a seguir.

$$\text{Maximizar } \sum_{i \in I} \sum_{j \in B_i} \alpha_i x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{Maximizar } \sum_{i \in I} \sum_{j \in B_i} (\beta_i + \gamma_i) x_{ij} \quad (2)$$

$$\text{Minimizar } \sum_{i \in I} \sum_{j \in B_i} \text{DIST}_{ij} x_{ij} \quad (3)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in B_i} x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J} z_j \leq P \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I \setminus j \in B_i} \alpha_i x_{ij} \leq C z_j \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I \setminus j \in B_i} x_{ij} \leq \mu \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (8)$$

$$z_j \in \{0, 1, 2, \dots, \text{MAXP}\} \quad \forall j \in J \quad (9)$$

A Função Objetivo (1) deve maximizar a quantidade de pessoas atendidas pelas bases de despacho de veículos de resgate, priorizando a cobertura de setores censitários com maior população residente. Já a Função Objetivo (2) deve maximizar o número de ocorrências (de ambos os tipos) atendidas pelas bases de despacho, com prioridade para a cobertura de setores com maior quantidade de ocorrências registradas. Enquanto isso, a Função Objetivo (3) deve minimizar a distância entre as bases de despacho e os pontos de demanda por atendimento. O conjunto de Restrições (4) garante que todo ponto de demanda deve ser atendido no máximo uma única vez por uma base de despacho de veículos de resgate. A Restrição (5) garante que a quantidade total de veículos de resgate alocados nas bases de despacho deve respeitar a quantidade total disponível, possibilitando o rearranjo dos veículos entre as bases sem o risco de se utilizar mais veículos que o disponível. Complementando a Restrição (5), o conjunto de Restrições (6) garante que a capacidade de cada base de despacho, em quantidade de pessoas que podem ser atendidas, deve ser respeitada. Tal limite é definido pelo produto da quantidade de veículos alocados a determinada base e a quantidade de pessoas que cada veículo pode atender. O conjunto de Restrições (7) garante que a quantidade máxima de pontos de demanda que cada base de despacho pode atender deve ser respeitada. Por fim, as Restrições (8) e (9) estão associadas ao domínio das variáveis de decisão do modelo matemático.

No entanto, para avaliar a contribuição de cada uma das funções objetivo propõe-se, ainda, que sejam atribuídos pesos a elas, a saber: W_1 : peso atribuído à população atendida; W_2 : peso atribuído às ocorrências registradas do Tipo 1 e do Tipo 2; e W_3 : peso atribuído às distâncias entre as bases de despacho e os pontos de demanda. Com isso, o modelo matemático multiobjetivo considerado neste artigo pode ser assim representado:

$$\text{Maximizar } \sum_{i \in I} \sum_{j \in B_i} W_1 (\alpha_i x_{ij}) + W_2 [(\beta_i + \gamma_i) x_{ij}] - \sum_{i \in I} \sum_{j \in B_i} W_3 \text{DIST}_{ij} x_{ij} \quad (10)$$

Sujeito a: (4)-(9).

4. ESTUDO DE CASO: RIO DE JANEIRO

O modelo matemático representado pela função objetivo (10) e pelas restrições (4-9) foi aplicado à cidade do Rio de Janeiro, que possui mais de 6,3 milhões de habitantes. Seu território de 1.200 km² é segmentado em 10.504 setores censitários, que são divididos em cinco Áreas de Planejamento (AP), sendo: AP 1 (Centro), AP 2 (Zona Sul), AP 3 (Zona Norte), AP 4 (Barra da Tijuca e Jacarepaguá) e AP 5 (Zona Oeste). Sabe-se, ainda, que devido às características naturais do município, sua população não é distribuída de maneira uniforme ao longo do seu território, como pode-se observar na Figura 1.

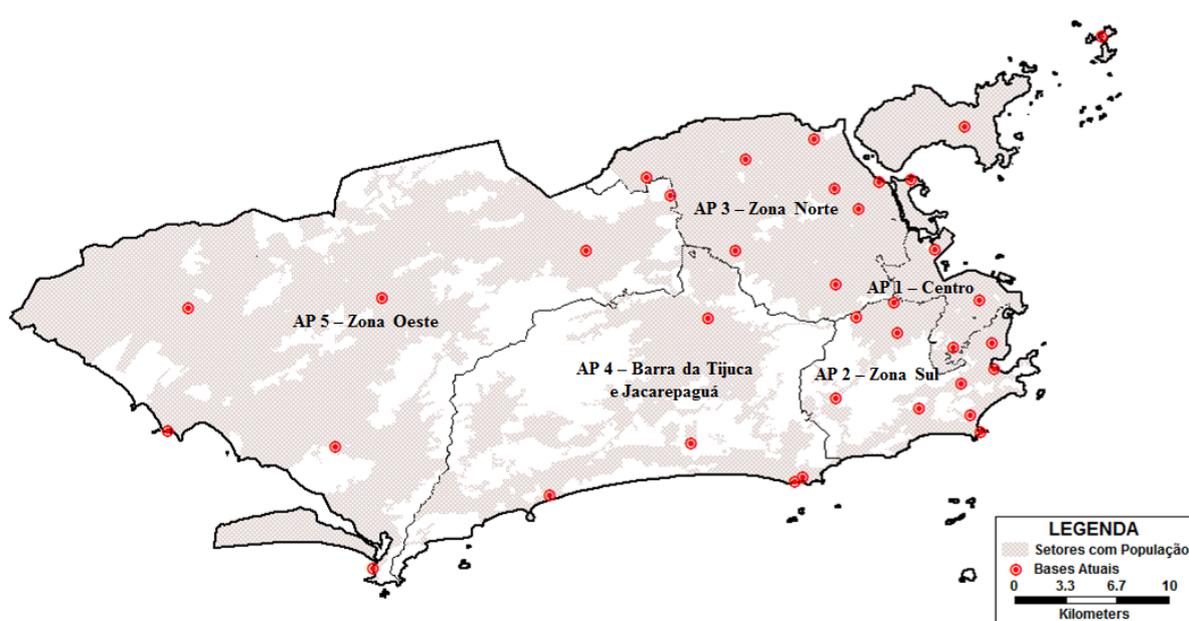


Figura 1: Representação da área de estudo.

O principal EMS da cidade encontra-se sob a responsabilidade do CBMERJ e a infraestrutura utilizada no atendimento à população compreende 36 bases de despacho de veículos de resgate (veja Figura 1), com um total de 80 veículos. Adotou-se como premissa, que cada base pode abrigar de 1 a 5 ambulâncias. Já a capacidade de cobertura atribuída a cada ambulância (parâmetro C), teve seu valor definido com base nos dados fornecidos pelo Corpo de Bombeiros e foi estipulada em 65.000 habitantes/veículo de resgate.

No ano de 2014 o CBMERJ registrou 105.696 ocorrências de solicitação de atendimento, as quais foram integralmente atendidas. Apesar de não haver regulamentação específica no Brasil, a instituição estipula, como meta de atendimento, 10 minutos de tempo de resposta a ocorrências em ambiente urbano, seguindo a norma norte-americana. Com este tempo de resposta definido e a base rodoviária real do município, foram encontradas as bases aptas a atender cada um dos pontos de demanda, ou seja, o conjunto B_i , com auxílio do TransCAD 5.0.

No que se refere às distâncias consideradas na função objetivo, por se tratar de uma decisão de longo prazo, em nível estratégico, não é necessário utilizar a distância real, uma vez que a distância Euclidiana já se mostra suficiente. Wang *et al.* (2005) definem a distância Euclidiana entre dois pontos como o comprimento do segmento de reta que os conecta. Vale destacar, ainda, que a adoção das distâncias Euclidianas, facilita o agrupamento dos setores censitários atendidos por uma mesma base de despacho de veículos de resgate.

O modelo matemático da Seção 3.3 foi avaliado por meio da comparação de cenários. A proposição inicial dos cenários ocorreu em função dos diferentes pesos W_1 , W_2 e W_3 atribuídos aos termos contemplados na Função Objetivo (FO). Com isso, os cenários foram organizados em quatro grupos: o primeiro levou em conta apenas a população atendida ($W_1 = 1, W_2 = 0$ e $W_3 = 0$); o segundo considerou apenas o total de ocorrências atendidas ($W_1 = 0, W_2 = 1$ e $W_3 = 0$); o terceiro apenas a distância percorrida pelos veículos de regaste ($W_1 = 0, W_2 = 0$ e $W_3 = 1$); e, por fim, no quarto grupo os pesos foram escolhidos de maneira a normalizar os valores de população, ocorrências e distância percorrida por demanda ($W_1 = 0,00019, W_2 = 0,00431$ e $W_3 = 1 / \underset{(i \in I, j \in B_i)}{\text{MAX}}\{DIST_{ij}\}$).

No entanto, os resultados obtidos para o terceiro grupo implicam no não atendimento da população e das ocorrências registradas, uma vez que, pelas restrições do modelo, não existe obrigatoriedade de alocação de bases de despacho a todos os pontos de demanda. Diante disso, as análises foram realizadas apenas para os demais grupos de cenários e optou-se por manter o peso W_3 normalizado ($W_3 = 1 / \underset{(i \in I, j \in B_i)}{\text{MAX}}\{DIST_{ij}\}$) em todos os testes, garantindo que a variável

$DIST_{ij}$ seja levada em consideração. Com isso, essa variável é utilizada para garantir que a base mais próxima de cada ponto de demanda possua preferência na alocação.

Os três grupos de cenários foram avaliados em função pelos atributos a seguir. O primeiro deles diz respeito ao número de locais candidatos a receber bases de despacho, que pode ser 36 (atual condição do CBMERJ) ou 57. A definição dos 57 pontos candidatos a receber bases de despacho de veículos de resgate foi feita seguindo os preceitos de Ferrari (2017): 1) foram definidos 36 locais onde já existem bases do CBMERJ; 2) testou-se um cenário-base com a cobertura atual do sistema e verificaram-se as áreas com maior deficiência de cobertura com a utilização das bases atuais. Com isso, foram posicionadas 21 novas unidades, quantidade definida pelo CBMERJ, nas regiões que se mostravam fora do alcance do padrão de cobertura almejado pelo órgão. Determinou-se a disposição dessas novas bases de maneira visual, com o apoio da Figura 2, de forma a posicionar algumas alternativas de novas bases próximas às áreas com grande densidade populacional sem atendimento.

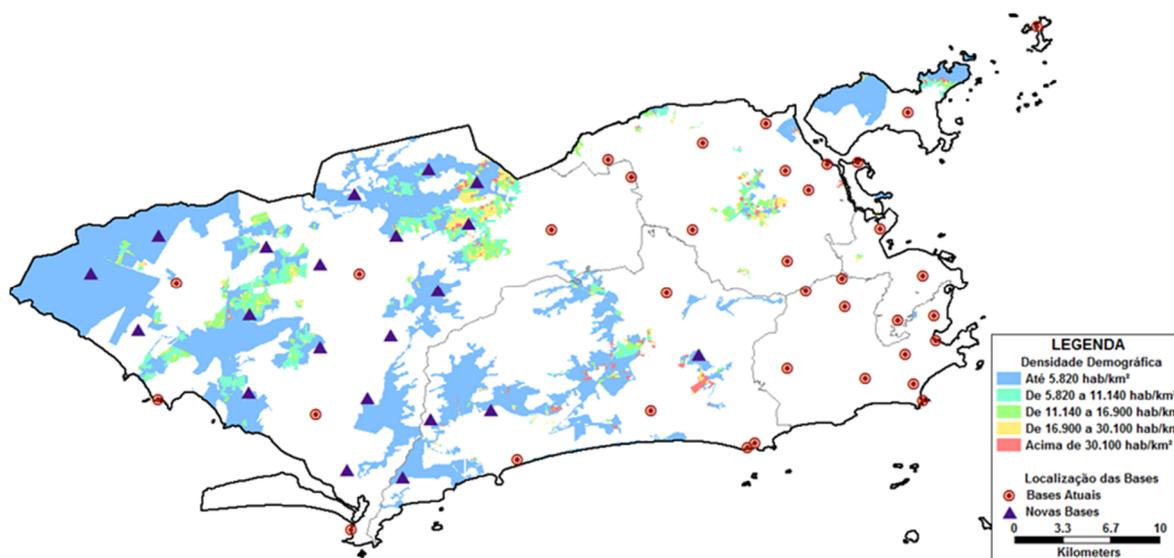


Figura 2: Densidade demográfica das áreas não atendidas e localização das possíveis novas bases de despacho.

Os demais atributos analisados dizem respeito ao:

- Tempo máximo de atendimento (7, 10 ou 15 minutos). O tempo de resposta de 10 minutos foi estipulado seguindo os princípios de atendimento do CBMERJ. Já os demais valores foram definidos com o intuito de testar as perdas ou os ganhos inerentes à variação no tempo máximo de resposta. Ambos foram definidos em conjunto com membros do Corpo de Bombeiros;
- Número de veículos utilizados (70, 80 ou 90 veículos). Assim como o tempo de resposta, o número de veículos disponível atualmente (80 veículos) foi flexibilizado com o objetivo de avaliar possíveis mudanças na estrutura disponível. O número menor de veículos (70) foi testado com o intuito de contemplar uma possível crise de recursos, como a quebra de veículos, tendo em vista a dificuldade financeira pela qual tem passado o Estado do Rio de Janeiro. Já os 90 veículos foram testados visando um cenário mais otimista, com aumento na disponibilidade de veículos devido, por exemplo, ao estabelecimento de novas parcerias.

Diante disso, 54 testes foram realizados. Como resultado do modelo obteve-se a indicação dos locais prioritários para receberem as bases, a quantidade de veículos em cada um desses locais e, ainda, suas áreas de cobertura (respeitando o tempo de resposta estipulado desde a base até cada um dos setores censitários a qual foi alocada).

5. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Os testes foram realizados em um computador de processador i7 6700K@, 4.5Ghz e 16 GB de memória RAM DDR4@3200Mhz, utilizando o sistema operacional Linux Ubuntu 17.04. Somente dois parâmetros do *software* Gurobi 7.02 foram alterados: o tempo máximo de processamento, que foi limitado em duas horas de execução por cenário, apesar de tal valor não ter sido atingido em nenhum deles; e, o GAP de parada, que foi definido em 0,02%, e mostrou uma redução considerável do tempo de processamento em relação ao GAP padrão de 0,001%.

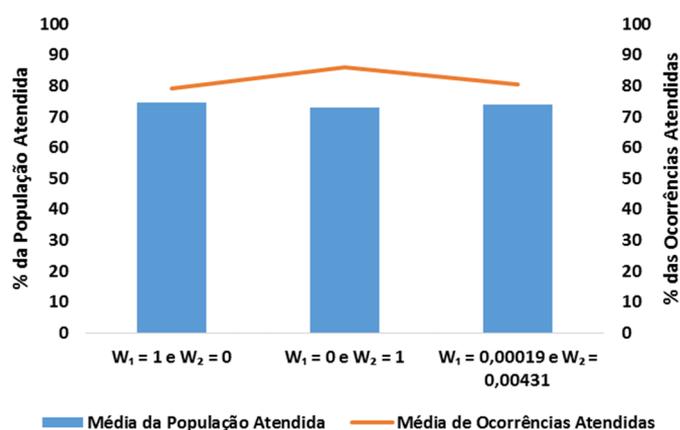


Figura 3. Percentual médio de população e ocorrências atendidas de acordo com os pesos atribuídos na FO.

As Figuras 3 e 4 apresentam os resultados gerais para os cenários. Como critérios de comparação entre os cenários, considerou-se, em um primeiro momento, o percentual da população atendida, o percentual das ocorrências atendidas e o número de bases efetivamente abertas. Na Figura 3, que trata da comparação dos percentuais médios da população e das ocorrências atendidas quando são atribuídos diferentes pesos aos objetivos da FO, percebe-se que a população

atendida permanece com valores muito próximos, em torno de 73%, nos três cenários apresentados. Diferente disso, o percentual de ocorrências atendidas sofre um incremento considerável (próximo de 10 pontos percentuais), chegando próximo dos 90% de cobertura média, quando se considera apenas maximizar o número de ocorrências atendidas.

Como é possível observar na Figura 4(a), o percentual médio da população e das ocorrências atendidas não sofre grande variação frente à alteração na possibilidade de abertura de bases (de 36 para 57 bases abertas). Com isso, acredita-se que o problema seja pouco sensível à mudança no número máximo de bases. Outro fato que corrobora com este entendimento é que o número máximo de bases abertas (57 bases) foi utilizado somente uma vez ao longo dos 54 testes realizados (ver Figura 4b). Vale ressaltar, ainda, que o cenário em que isso ocorreu apresentava em suas configurações um possível fator agravante, o tempo máximo de resposta de 7 minutos. Além disso, foram abertas mais de 50 bases de despacho de veículos de resgate apenas em cenários onde o tempo de resposta correspondia ao menor tempo de resposta avaliado.

Já no que se refere ao número de veículos disponíveis para atendimento (Figura 4c), percebe-se que à medida que este valor aumenta, aumentam também os percentuais médios de cobertura, tanto para a população quanto para as ocorrências. Ao contrário do critério anterior, o problema aparenta ser mais sensível às variações no número de veículos. Tal situação já era esperada, uma vez que, com o incremento nessas quantidades, aumenta proporcionalmente a capacidade de cobertura da população. Pode-se afirmar, então, que isso ocorre porque o número de veículos de resgate contribui diretamente para a estimativa da cobertura máxima possível, já que determina a capacidade de atendimento das bases de despacho.

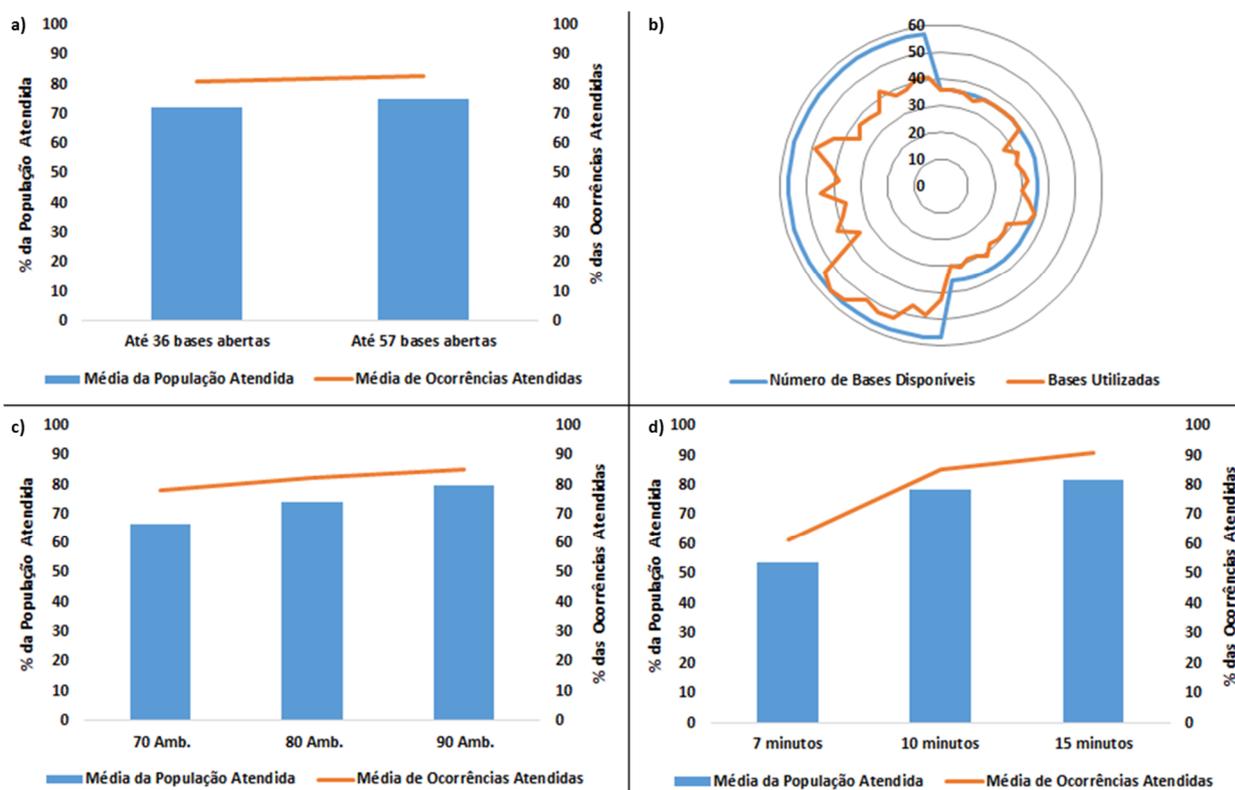


Figura 4. a) Resultado de acordo com o número de bases disponíveis; b) Bases utilizadas versus bases disponíveis para abertura ao longo 54 testes realizados; c) Resultado de acordo com o número de veículos disponíveis, e d) Resultado de acordo com o tempo máximo de resposta.

Quanto ao tempo de resposta às chamadas, veja Figura 4(d), percebe-se uma grande variação entre 7 e 10 minutos, seguida de um incremento menor entre 10 e 15 minutos. Os valores percentuais, tanto de população quanto de ocorrências atendidas saltam cerca de 25% entre o menor tempo estabelecido (7 minutos) e o tempo usualmente utilizado como base para o CBMERJ (10 minutos). Tal situação demonstra, ainda, uma grande sensibilidade do problema em relação ao tempo de atendimento de 7 minutos, ou seja, para este tempo a FO varia muito pouco, independente dos outros critérios estabelecidos para definição dos cenários.

Diante de coeficientes de variação tão próximos de zero para os 7 minutos de tempo de resposta, como observado na Figura 5, os demais coeficientes, que ainda são baixos, tornam-se representativos ao ponto de causar uma acentuada curva de variação. Percebe-se, então, que as maiores variações ocorrem em função dos pesos que são atribuídos a ela e do tempo de atendimento, seja para a disponibilidade de 36 ou 57 bases a serem abertas. Com isso, o melhor e o pior cenário observados para a FO que normaliza os dois objetivos de cobertura (população e ocorrências) serviram como base para a elaboração de mapas georreferenciados para facilitar a compreensão da diferença entre os cenários.

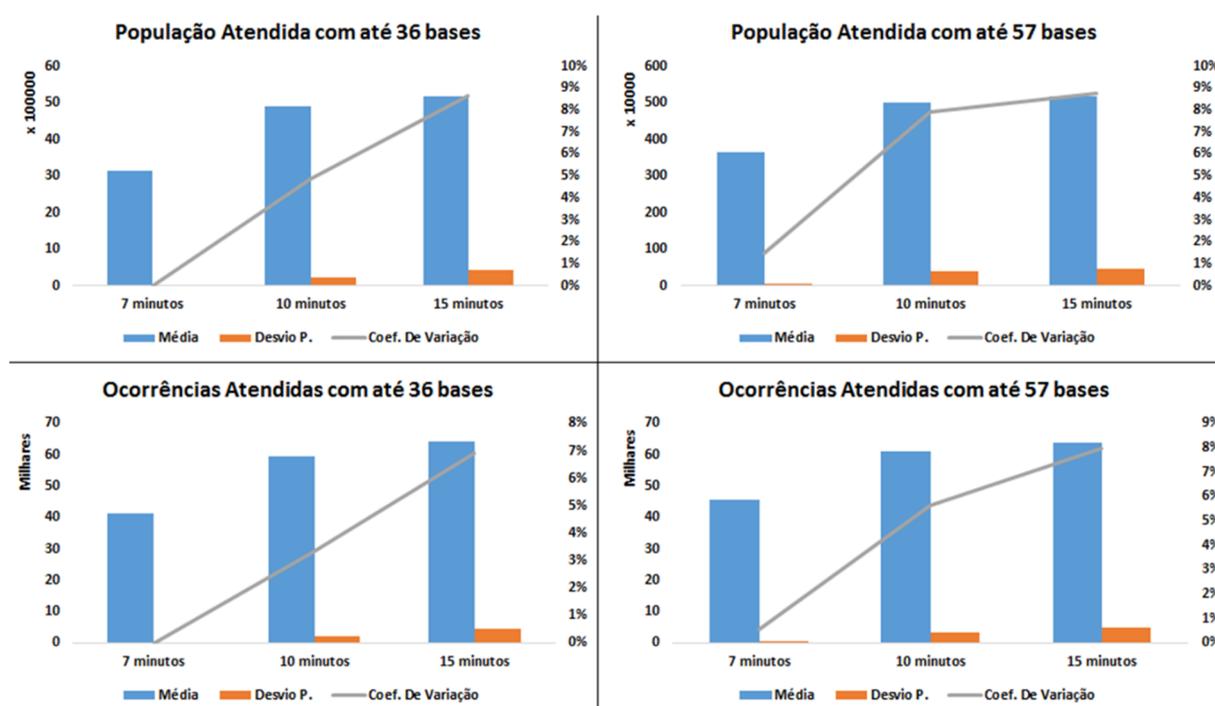


Figura 5: Média, desvio padrão e coeficiente de variação para população e ocorrências atendidas de acordo com o tempo máximo de resposta.

Nota-se na Figura 6 que grande parte do território do município pode ser atendido quando se utiliza como parâmetros a possibilidade de abertura de 57 bases de despacho, 90 veículos de emergência e até 15 minutos de tempo de resposta. No entanto, vale destacar que as áreas que permanecem sem cobertura, apesar de mostrarem-se pequenas, estão espalhadas por todo o município, especialmente na região das AP 4 e 5, que contemplam a Zona Oeste do município.

Já na Figura 7 observa-se que, ao disponibilizar até 36 bases para serem abertas, com os mesmos 90 veículos, e reduzir o tempo de atendimento para 7 minutos, há um considerável incremento das áreas descobertas em todo o município, especialmente nas AP 3, 4 e 5. Com isso, tal cenário apresenta o pior resultado para a FO normalizada.

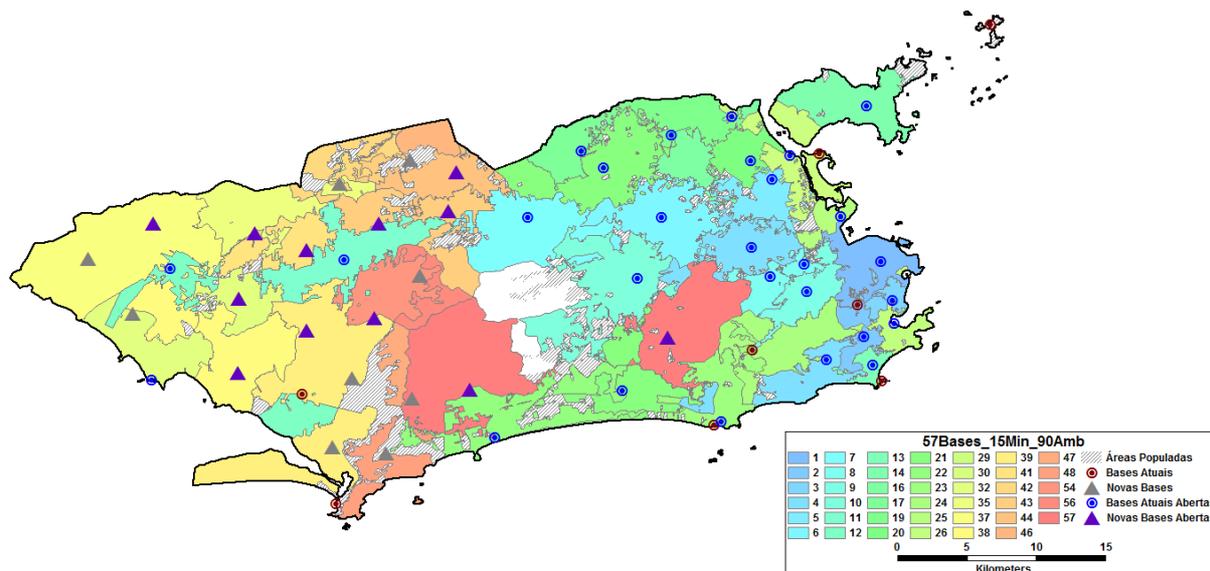


Figura 6: Representação do melhor cenário obtido para a função objetivo normalizada.

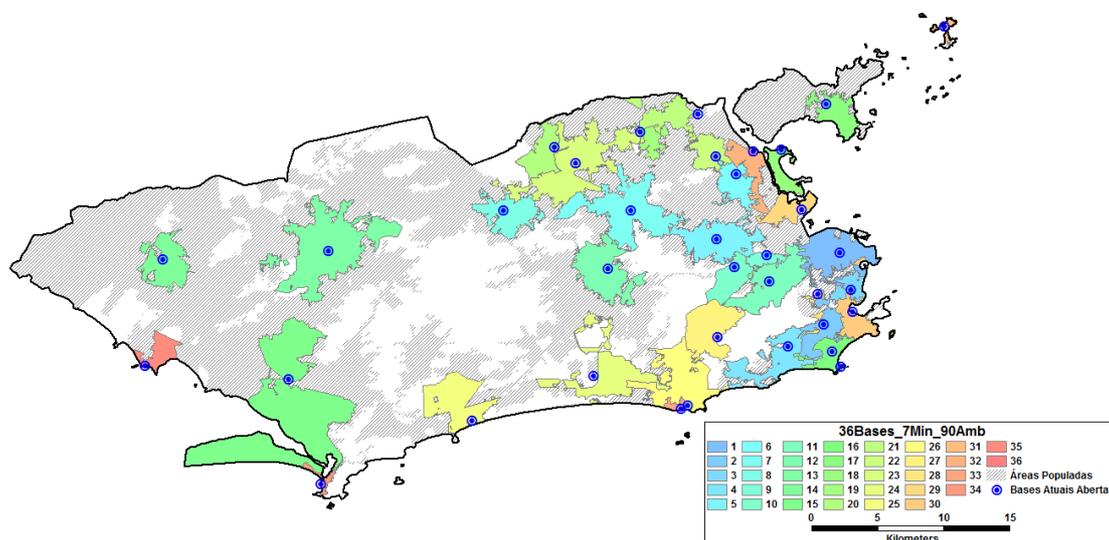


Figura 7: Representação do pior cenário obtido para a função objetivo normalizada.

No entanto, é importante destacar que, apesar dos melhores testes contemplarem a possibilidade de abertura de até 57 bases, é possível obter resultados bastante satisfatórios com a abertura de até 36 bases de despacho. Um exemplo disso é que, em um cenário com a possibilidade de abrir até 36 bases, com 15 minutos de tempo de resposta e 90 veículos utilizados, empregouse, efetivamente, apenas 30 bases e a cobertura chegou a 5,8 milhões de pessoas e atendimento de 67 mil ocorrências.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foi apresentada uma avaliação multiobjetivo que levou em consideração uma adaptação do modelo matemático proposto por Ferrari (2017) para localização de bases de despacho de ambulâncias, que considera a maximização da população e das ocorrências cobertas, assim como a minimização da distância percorrida entre as bases e seus respectivos pontos de

demanda atendidos, para auxiliar no planejamento governamental relacionado aos atendimentos de emergência.

Por meio do aprofundamento teórico e, principalmente, da comparação de cenários, foi possível responder algumas questões levantadas por este trabalho. A primeira delas aponta que o aumento do número de bases, por si só, não é capaz de impactar significativamente na cobertura da população e das ocorrências. Isso ocorre porque diversos outros fatores condicionam a otimização da FO, como o peso utilizado em cada termo, o número de veículos associado a cada base e, principalmente, o tempo máximo de atendimento. No entanto, acredita-se que o incremento no número de bases seja capaz de reduzir a distância percorrida até o ponto de demanda por atendimento.

Com o aumento no tempo de atendimento, um maior número de bases é capaz de atender a região, diminuindo a chance de a mesma permanecer descoberta para o tempo de atendimento indicado. Acredita-se, que por esse motivo os melhores resultados foram obtidos com tempo de resposta de até 15 minutos, enquanto os piores resultados ficaram estão relacionados ao menor tempo de resposta indicado, de 7 minutos (menos que a metade do maior tempo considerado).

Quanto a relação entre o número de veículos e o aumento dos percentuais de cobertura, pode-se dizer que o aumento ocorre de maneira proporcional, como era de se esperar, já que o número de veículos é o responsável direto pela capacidade de atendimento de cada base de despacho. Sendo assim, mesmo que o tempo de resposta não fosse um fator limitante, a mesma teria seu crescimento atribuído ao número de ambulâncias disponíveis para atendimento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Processos 1700063, 1717895 e 1587582, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Processo 307835/2017-0, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), Processo 203.231/2017, pelo apoio financeiro na elaboração deste trabalho. Agradecem, ainda, ao Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro pela disponibilidade da base de dados utilizada na pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Alsalloum, O. I. e G. K. Rand (2006) Extensions to emergency vehicle location models. *Computer & Operations Research*, v. 33, p. 2725-2743. DOI: 10.1016/j.cor.2005.02.025.
- Aringhieri, R.; G. Carello e D. Morale (2007) Ambulance location through optimization and simulation: The case of Milano urban area. *Proceedings of XXXVIII Annual Conference of the Italian Operations Research Society Optimization and Decision Sciences*, AIRO, Genova, Italy, p. 1-29.
- Ball, M. O. e F. L. Lin (1993) A reliability model applied to emergency service vehicle location. *Operations Research*, v. 41, p. 18-36. DOI: 10.1287/opre.41.1.18.
- Bélangier, V.; Y. Kergosien; A. Ruiz e P. Soriano (2016) An empirical comparison of relocation strategies in real-time ambulance fleet management. *Computers & Industrial Engineering*, v. 94, p. 216-229. DOI: 10.1016/j.cie.2016.01.023.
- Brotcorne, L.; G. Laporte e F. Semet (2003) Ambulance location and relocation models. *European Journal of Operational Research*, v. 147, p. 451-463. DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00364-8.
- Caliper. (2008) *TransCAD - Transportation Workstation Software*, Versão 5.0. Caliper Corporation, Newton, USA.
- Chung, C.; D. Schilling e R. Carbone (1983) The capacitated maximal covering problem: a heuristic. *Anais do Proceedings of the Fourteenth Annual Pittsburgh Conference on Modeling and Simulation*, Pittsburgh, p. 1423-1428.
- Church, R. e C. ReVelle (1974) The maximal covering location problem. *Papers in Regional Science*, v. 32, n. 1, p. 101-118. DOI: 10.1007/BF01942293.
- Current, J. e J. Storbeck (1988) Capacitated covering models. *Environment and Planning B: Planning and Design*, v. 15, p. 153-163. DOI: 10.1068/b150153.
- Ferrari, T. (2017) *Modelagem matemática para localização de bases de despacho de veículos de resgate: um estudo de caso no município do Rio de Janeiro*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 129 p.
- Galvão, R. D.; F. Chiyoshi e R. Morabito (2005) Towards unified formulations and extensions of two classical probabilistic location model. *Computers & Operations Research*, v. 32, p. 15-33. DOI: 10.1016/S0305-0548(03)00200-4.
- Gendreau, M.; G. Laporte e F. Semet (2001) A dynamic model and parallel Tabu search heuristic for real-time ambulance relocation. *Parallel Computing*, v. 27, p. 1641-1653. DOI: 10.1016/S0167-8191(01)00103-X.

- Gurobi Optimization, Inc. (2017) *Gurobi Optimizer*, Versão 7.02. Disponível em: <http://www.gurobi.com>.
- Haghani, A. (1996) Capacitated maximum covering location models: formulations and solution procedures. *Journal of Advanced Transportation*, v. 30, n. 3, p. 101-136. DOI: 10.1002/atr.5670300308.
- Kergosien, Y.; V. Bélanger; P. Soriano; M. Gendreau e A. Ruiz (2015) A generic and flexible simulation-based analysis tool for EMS management. *International Journal of Production Research*, v. 53, n. 24, p. 7299-7316. DOI: 10.1080/00207543.2015.1037405.
- Knight, V. A.; P. R. Harper e L. Smith (2012) Ambulance allocation for maximal survival with heterogeneous outcome measures. *Omega*, v. 40, p. 918-926. DOI: 10.1016/j.omega.2012.02.003.
- Maleki, M.; N. Majlesinasab e M. M. Sepehri (2014) Two new models for redeployment of ambulances. *Computers & Industrial Engineering*, v. 78, p. 271-284. DOI: 10.1016/j.cie.2014.05.019.
- Marín, A. (2011) The discrete facility location problem with balanced allocation of costumers. *European Journal of Operational Research*, v. 210, p. 27-38. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.10.012.
- Melo, M. T.; S. Nickel e F. Saldanha-da-Gama (2009) Facility location and supply chain management - A review. *European Journal of Operational Research*, v. 196, n. 2, p. 401-412. DOI: 10.1016/j.ejor.2008.05.007.
- ReVelle, C. S.; H. A. Eiselt e M. S. Daskin (2008) A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. *European Journal of Operational Research*, v. 184, p. 817-848. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.12.044.
- Su, Q.; Q. Luo e S. H. Huang (2015) Cost-effective analyses for emergency medical services deployment: a case study in Shanghai. *International Journal of Production Economics*, v. 163, p. 112-123. DOI: 10.1016/j.ijpe.2015.02.015.
- Takeda, R. A.; J. A. Widmer e R. Morabito (2007) Analysis of ambulance decentralization in an urban emergency medical service using the hypercube queueing model. *Computers & Operations Research*, v. 34, p. 727-741. DOI: 10.1016/j.cor.2005.03.022.
- Wang, L.; Y. Zhang e J. Feng (2005) On the Euclidean distance of images. *Proceedings of IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 27, n. 8, p. 1334-1339. DOI: 10.1109/TPAMI.2005.165.
- Yin, P. e L. Mu (2012) Modular capacitated maximal covering location problem for the optimal siting of emergency vehicles. *Applied Geography*, v. 34, p. 247-254. DOI: 10.1016/j.apgeog.2011.11.013.