

# Problema do nível de serviço na localização de bases de veículos de resgate

## *Service level issue in emergency medical vehicle bases location*

Luis Eduardo Santos Fortes<sup>1</sup>, Glaydston Mattos Ribeiro<sup>1</sup>, Laura Bahiense<sup>1</sup>,  
Pedro Henrique González<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

Contato: lfortes@pet.coppe.ufrj.br,  (LESF); glaydston@pet.coppe.ufrj.br,  (GMR); laura@pet.coppe.ufrj.br,  (LB);  
pegonzalez@cos.ufrj.br,  (PHG)

### Recebido:

13 de fevereiro de 2023

### Aceito para publicação:

8 de maio de 2023

### Publicado:

10 de julho de 2023

### Editor de área:

Renato da Silva Lima  
Universidade Federal de Itajubá,  
Brasil

### Palavras-chave:

Localização de facilidades.  
Nível de serviço.  
Serviço médico de emergência.

### Keywords:

Facility location.  
Service level.  
Emergency medical service.

### RESUMO

O presente artigo apresenta o problema da localização de bases de veículos de resgate aplicado à Zona Oeste do município do Rio de Janeiro, levando-se em conta não somente a localização das facilidades em relação aos pontos de demanda, mas também a parcela da população que será capaz de ser atendida dentro de níveis de serviço pré-determinados, com o objetivo de avaliar o atendimento de emergência realizado pelos serviços médicos de emergência em determinadas condições de operação. Após o desenvolvimento e aplicação de um modelo de otimização que acrescenta o nível de serviço ofertado ao problema da localização de facilidades, constatam-se os efeitos negativos de configurações subdimensionadas e da baixa qualidade na prestação do serviço, sendo tal sistema incapaz de atender em tempo hábil, com probabilidades altas, a demanda por atendimentos.

### ABSTRACT

This paper presents the rescue vehicle base location problem applied in Rio de Janeiro County west zone, considering not only the facilities location regarding to demand points, but also the amount of population that will be able to be served within predetermined service levels, with the objective of evaluating emergency care provided by emergency medical services in certain operating conditions. After the development and application of an optimization model that joins the service level offered to the facilities location problem, it can be noted the negative effects of undersized configurations and low-quality service delivery, making this system unable to attend on time, with high probabilities, the demand for care.

DOI: 10.58922/transportes.v31i2.2879



## 1. INTRODUÇÃO

A localização de instalações ou facilidades é um problema de cunho estratégico que auxilia à tomada de decisão, sendo composto por definições sobre o posicionamento de recursos

pertencentes a uma organização, recursos esses que precisam atender de forma eficiente os pontos de demanda (Farahani et al., 2019).

Os problemas de localização, conforme destacado em Klose e Drexl (2005), possuem objetivos distintos e são resolvidos de acordo com suas principais necessidades, portanto não podem ser tratados de forma genérica. Cada problema deve ser examinado de forma particular considerando suas características fundamentais: organização da região geográfica, objetivos desejados, restrições que envolvem as facilidades, estágios de atendimento, quantidade de produtos ou serviços envolvidos e influência da demanda local.

Observa-se que ao longo dos anos, métodos para a resolução de problemas de localização de facilidade vêm sendo aplicados com maior engajamento no setor da saúde, em específico aos serviços de resgate de emergência, que são um dos principais acessos às unidades de atendimento.

O Serviço Médico de Emergência (SME), conhecido internacionalmente como *Emergency Medical Service*, é um ponto chave do sistema de saúde. O seu objetivo consiste em reduzir os riscos de mortalidade e traumas graves, fornecendo atendimento de primeiros socorros e transporte de vítimas entre o local do acidente e a unidade de atendimento à saúde (Repede e Bernardo, 1994).

No intuito de atender os objetivos do SME, analisar o sistema de resgate de emergência é essencial, pois a partir desta ação é possível avaliar as premissas envolvidas, como, por exemplo, o nível de serviço que está sendo ofertado. Caso as premissas citadas não estejam adequadas, a aplicação de métodos para a resolução de problemas de localização de facilidades, em conjunto com técnicas de cunho probabilístico, permite otimizar e melhorar a oferta do serviço e desta forma minimizar os impactos negativos aos usuários (Klose e Drexl, 2005).

O problema de localização de bases de veículos de resgate, em especial de ambulâncias, deve ser tratado com especial atenção, uma vez que o seu principal compromisso é garantir que vidas humanas sejam preservadas e salvas. Portanto, utilizar apenas uma abordagem de “minimizar custos” ou “maximizar cobertura” costuma não ser suficiente. O foco deve estar em alcançar, além das abordagens mais imediatas, que uma maior porcentagem da população tenha um elevado nível de serviço, principalmente em relação ao tempo de espera pelo atendimento (Şahin Macit, 2015).

É importante ressaltar que quando o sistema de emergências não é capaz de fornecer o serviço em tempo adequado, vidas são postas em risco (Li et al., 2011). Por exemplo, no caso de paradas cardíacas, a probabilidade de sobrevivência do paciente é reduzida entre 7 e 10% a cada minuto de atraso no tratamento, evidenciando a necessidade de um atendimento inicial apropriado e sem demoras (Aringhieri et al., 2017).

De acordo com a *World Health Organization* (WHO, 2005), um atendimento pré-hospitalar ágil e de qualidade é primordial para a redução da mortalidade e para a minimização de sequelas. No caso de ocorrência de enfermidades graves (traumas graves, acidentes vasculares cerebrais, paradas cardíacas e falhas respiratórias) o atendimento dos SME no primeiro quinto da hora (*First Hour Quintet*) impacta expressivamente na probabilidade de recuperação da vítima e na redução de sequelas (Krüger et al., 2010). Portanto, reduzir ao máximo o tempo até a chegada do atendimento pré-hospitalar deve ser o objetivo principal a ser buscado.

O presente estudo inicia-se com a análise do problema da alocação de bases de resgate levando-se em conta, não só a cobertura da população, como também o nível de serviço esperado em termos de tempo de espera para atendimento. Para isso, apresenta-se um modelo matemático para o problema em questão, seguido de um estudo de caso utilizando os dados da Zona Oeste do município do Rio de Janeiro.

Este trabalho visa ainda cobrir uma lacuna existente na literatura sobre os estudos de localização de facilidades voltados ao melhor posicionamento de bases de veículos de resgate que levam em consideração o nível de serviço ofertado ao cliente. Para se ter a dimensão da quantidade de estudos propondo a solução destes três problemas combinados, uma análise realizada na plataforma *Web of Science*, que é a primeira e mais utilizada base de dados de trabalhos científicos no mundo (Birkle et al., 2020), está representada no diagrama de Venn da Figura 1.



**Figura 1.** Quantidade de Trabalhos publicados por tema.

Nota-se que o assunto localização de facilidades possui uma quantidade considerável de publicações de acordo com a base de dados. Ao serem restritas as localidades a unicamente bases de apoio, percebe-se que menos da metade dos trabalhos se referem a este tipo de facilidade. Quando são pesquisadas bases que tenham por objetivo prestar apoio a serviços médicos, levando-se em consideração o nível de serviço ofertado, menos de 0,1% do universo total dos trabalhos é alcançado.

Além de colaborar para a redução dessa lacuna na literatura, a contribuição deste artigo se dá em três aspectos principais: *i)* no âmbito do planejamento público do sistema de saúde, onde novas políticas e novos processos podem ser planejados para a operação dos veículos de resgate; *ii)* no que se refere a questões socioeconômicas, em função da possibilidade de se entender e propor medidas mitigatórias para que a população seja atendida no tempo suficiente para a manutenção da vida e redução de sequelas; e *iii)* na vertente acadêmica e científica com a proposta e aplicação de um modelo matemático para a solução do problema da localização, levando-se em conta a probabilidade de espera em uma fila.

Para tanto, além desta seção introdutória, este artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre modelagens envolvidas em problemas de localização de bases de veículos de resgate e em problemas probabilísticos relacionados a filas de espera em sistemas congestionados, bem como tópicos relacionados a estas temáticas, seguido da Seção 3 que apresenta o modelo matemático

proposto. A Seção 4 apresenta o estudo de caso, que aborda a região escolhida para estudo, bem como os resultados computacionais do experimento. Por fim, na Seção 5 são apresentadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Devido aos impactos causados diretamente à sociedade, problemas que envolvem serviços de emergência médica têm se tornado cada vez mais atrativos no ramo da pesquisa, visto que vidas são afetadas quando o sistema de emergência não oferece um serviço eficiente (Li et al., 2011).

De acordo com Bélanger et al. (2016), os serviços de emergência precisam ser eficientes para os usuários deste sistema, para isso é necessário que a frota de ambulâncias seja posicionada de forma estratégica para que haja uma boa cobertura da região de demanda, considerando os fatores de incerteza que podem afetar o serviço.

Castañeda e Villegas (2016) abordam em seu artigo a análise do serviço de emergência médica por meio de modelos matemáticos de localização de instalações. Neste trabalho, diferentes cursos de melhorias aos atendimentos às vítimas de acidentes de trânsito em Medellín são avaliados, visto o aumento das lesões decorrentes destes eventos. Os resultados obtidos sugerem aumentar a frota de veículos de resgate ao invés de trocar a localização das bases de veículos.

No modelo de cobertura de conjuntos de localização construído por Toregas et al. (1971), o objetivo é apresentar um modelo que permita minimizar o número de veículos de resgate necessários para cobrir todos os pontos de demanda em uma determinada região, em função de uma distância ou um tempo mínimo previamente definido.

Melo et al. (2009) sugerem algumas perguntas que devem ser respondidas pelos Problemas de Localização de Facilidades (PLFs) como: “Quais e quantas bases devem ser abertas?”; “Quais usuários devem ser cobertos de acordo com as facilidades disponíveis?”; e “O que o modelo permitiria melhorar dentro do sistema?”.

Segundo Daskin e Dean (2004), existem modelos que melhor abordam PLFs na área de resgate de emergência, dentre eles, a determinação do número mínimo de instalações com suas localizações para atender toda a demanda. Este PLF é também conhecido como problema de cobertura de conjuntos.

Ferrari (2017) apresenta uma modelagem matemática para subsidiar o planejamento da localização de bases de despacho de veículos de resgate, que leve em conta a maximização da população coberta e dos diferentes tipos de ocorrência registrados, bem como a minimização do número de bases de despacho abertas e da distância entre a base de despacho e o ponto de demanda.

Revelle e Hogan (1989) propõem uma versão probabilística do problema de cobertura para localização de facilidades que busca minimizar o tempo máximo de resposta de  $p$  ambulâncias com nível de confiabilidade  $\alpha$ . Neste modelo, a probabilidade de resposta de uma ambulância a um ponto de demanda em sua área de cobertura é estimada considerando o desvio dos tempos de resposta.

Marianov e Serra (1998) apresentaram um método probabilístico de filas, onde usuários são alocados a pontos de atendimento, de modo a maximizar a população coberta,

considerando um padrão de tempo ou distância percorrida, bem como se um usuário é atendido na chegada ao centro de atendimento. Considera-se que o usuário será atendido se este encontrar no máximo  $b$  usuários na fila com probabilidade de pelo menos  $\alpha$ .

Marianov e Serra (2002) ainda propõem um outro método probabilístico de filas, que localiza o número mínimo de pontos de atendimento, onde o número de servidores em cada ponto de atendimento é variável.

As referências bibliográficas abordadas demonstram, propondo soluções com abordagem matemática, a importância da localização de facilidades que abrigam veículos de emergência, bem como a importância da eficiência na prestação do serviço de resgate para a mitigação do risco de morte ou de sequelas na ocorrência de eventualidades que precisem de atenção médica.

### 3. METODOLOGIA DE PESQUISA

Considerando o que se propõe nesse estudo, este artigo utiliza como base os estudos realizados por Ferrari (2017) e por Marianov e Serra (1998, 2002). O primeiro estudo, realizado por Ferrari (2017), mostra o *trade off* entre a maximização de cobertura e a diminuição do número de bases abertas. Já em Marianov e Serra (1998), são propostos modelos probabilísticos para o problema de máxima cobertura-alocação para tempo restrito em filas em sistemas congestionados. Por fim, o terceiro estudo, realizado por Marianov e Serra (2002), traz uma formulação do problema de cobertura-alocação que localiza o menor número de instalações e aloca o número mínimo de servidores para elas, de modo a minimizar os efeitos de fila.

Dado o exposto, este estudo tem por objetivo avaliar o atendimento de emergência realizado pelos SME nas condições atuais de operação, levando-se em conta não somente a localização das bases dos veículos de resgate em relação aos pontos de demanda, mas também a porção da população que será capaz de ser atendida dentro de níveis de serviço pré-determinados. Para alcançar o objetivo proposto, ferramentas computacionais foram desenvolvidas para otimizar a distribuição das bases, e analisar o comportamento do modelo matemático proposto a partir da instância elaborada a partir dos dados da Zona Oeste do município do Rio de Janeiro.

Todo o processo utilizado para a elaboração do estudo pode ser compreendido por meio da Figura 2.

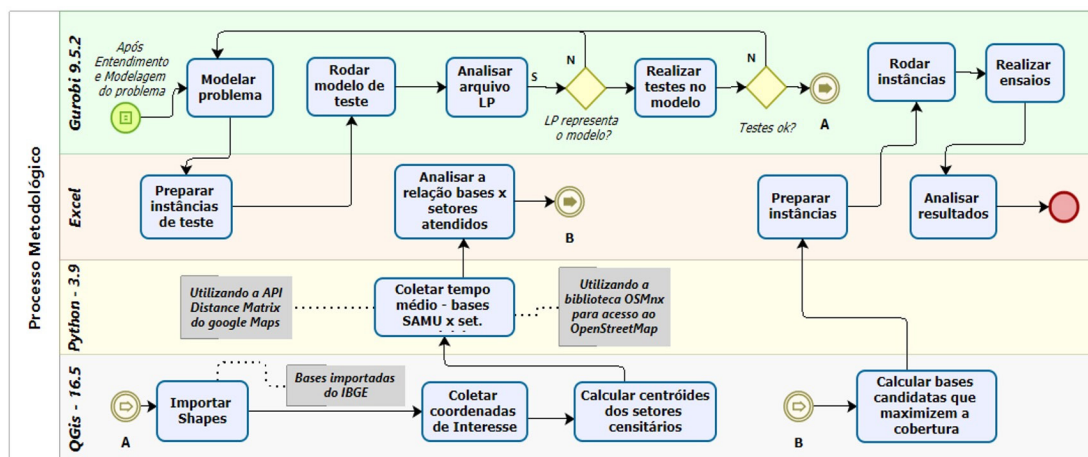


Figura 2. Fluxograma metodológico.

### 3.1. Modelo matemático

O modelo proposto busca maximizar o atendimento a chamadas de emergência e diminuir a utilização de bases, considerando a cobertura da população existente em cada centro de demanda, o tempo de atendimento entre cada base de veículos e cada ponto de demanda, a capacidade operacional das bases e o tempo de espera máximo para o usuário ser atendido com um nível de confiança  $\pi$ .

Para elaboração do modelo foram necessárias as definições de algumas premissas, tais como: *i)* a escolha de pontos que representam as bases de veículos para o atendimento de demanda; *ii)* a definição de que bases de veículos são capazes de atender a cada um dos pontos de demanda; *iii)* a quantidade máxima de bases de veículos; *iv)* a disponibilidade de veículos de resgate; *v)* a capacidade máxima de veículos que cada base suporta; *vi)* o tempo de espera máximo esperado para o atendimento com um nível de confiança  $\pi$ ; *vii)* a frequência de solicitações de cada ponto de demanda para cada ponto de atendimento; e *viii)* a taxa de atendimento de cada base.

De acordo com os fatores definidos anteriormente, considere  $I$  um conjunto de todos os pontos de demanda que precisam ser atendidos,  $J$  um conjunto que representa todos os lugares que podem receber uma base de veículos de resgate,  $B_i \subseteq J$  um conjunto que engloba todas as bases que podem atender um ponto de demanda  $i \in I$  de acordo com um padrão de cobertura de área pré-determinado, e  $E \subseteq J$  um conjunto de bases de veículos previamente existentes. Considere ainda um conjunto  $C_j$  que representa todas as capacidades  $c \in C_j$  possíveis de cobertura e/ou atendimento para cada veículo de resgate a partir da base  $j \in J$ .

A partir das considerações mencionadas, foram estabelecidos parâmetros como apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1:** Parâmetros utilizados no modelo matemático proposto

Parâmetro	Descrição
$\alpha_i$	População do ponto de demanda $i \in I$ ;
$P$	Quantidade total de veículos disponíveis para serem alocados às bases de veículos;
$MAXP_j$	Quantidade máxima de veículos que cada base $j \in J$ pode receber;
$MAXpd$	Quantidade máxima de pontos de demanda que uma base pode atender;
$Cob$	Capacidade de atendimento de cada veículo de resgate;
$Q$	Quantidade mínima de bases de veículos pré-existentes que devem ser selecionadas para permitir que novas bases sejam abertas;
$N$	Quantidade máxima de novas bases de veículos de veículos de resgate que podem ser escolhidas;
$f_i$	Demanda por atendimento de cada ponto de demanda $i \in I$ ;
$\mu_j$	Taxa de atendimento de cada base $j \in J$ ; e
$\lambda_{c_j^\pi}$	Taxa de chamadas para cada base $j \in J$ utilizando $c \in C_j$ veículos, sujeita a uma probabilidade $\pi$ .

A Tabela 2 apresenta as variáveis de decisão do modelo proposto.

**Tabela 2:** Parâmetros utilizados no modelo matemático proposto

Variável de Decisão	Descrição
$x_{ij} \in \{0,1\} \forall i \in I, j \in B_i$	Se $x_{ij} = 1$ , o ponto de demanda $i \in I$ deve ser alocado a base de veículos de resgate $j \in B_i$ , caso contrário, $x_{ij} = 0$
$y_j \in \{0,1\} \forall j \in J$	Se $y_j = 1$ , a base de veículos de resgate $j \in J$ deve ser aberta, caso contrário, $y_j = 0$
$\Gamma_{cj} \in \{0,1\}$	Se $\Gamma_{cj} = 1$ , a quantidade de ambulâncias a ser utilizada na base $j \in J$ utiliza $c \in C_j$ veículos, caso contrário, $\Gamma_{cj} = 0$
$a \in \{0,1\}$ .	Se $a = 1$ , a quantidade mínima $Q$ de bases de veículos de veículos de resgate foi satisfeita, caso contrário, $a = 0$
$z_j \in Z^+ \forall j \in J$	Variável inteira que representa a quantidade de veículos de resgate que deve ser alocada em uma base $j \in J$ .

Sendo assim, o modelo proposto é apresentado a seguir, nas Equações 1 a 18.

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

Sujeito a:

$$\sum_{j \in B_i} x_{ij} \leq 1 \forall i \in I \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq y_j \forall i \in I, j \in B_i \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} z_j \leq P \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} \alpha_i x_{ij} \leq Cob z_j \forall j \in B_i \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq MAXpd \forall j \in B_i \quad (6)$$

$$\frac{(\sum_{j \in E} y_j - Q)}{|E|} \leq a \leq \left\lceil \frac{(\sum_{j \in E} y_j - Q)}{|E|} \right\rceil + 1 \quad (7)$$

$$\sum_{j \in E \setminus E} y_j \leq N a \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} \alpha_i z_j \geq y_j \forall j \in J \quad (9)$$

$$z_j \leq MAXP_j y_j \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} f_i x_{ij} \leq \sum_{c \in C_j} \Gamma_{cj} \lambda_{cj} \forall j \in J \quad (11)$$

$$\sum_{c \in C_j} c \Gamma_{cj} = z_j \forall j \in J \quad (12)$$

$$\sum_{c \in C_j} \Gamma_{cj} = y_j \forall j \in J \quad (13)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \forall i \in I, j \in B_i \quad (14)$$

$$y_j \in \{0,1\} \forall j \in J \quad (15)$$

$$\Gamma_{cj} \in \{0,1\} \forall j \in J, c \in C_j \quad (16)$$

$$a \in \{0,1\} \quad (17)$$

$$z_j \in \mathbb{Z}^+ \forall j \in J \quad (18)$$

A Função Objetivo (1) tem por finalidade garantir que a maior demanda possível seja atendida pelas bases capazes de servir cada ponto de demanda.

O conjunto de Restrições (2) afirma que cada ponto de demanda deve ser atendido no máximo uma única vez por uma base de veículos de resgate. Já o conjunto de Restrições (3) garante que um ponto de demanda só poderá ser atendido por uma base se esta estiver disponível para atendimento e for acionada para abertura. A Restrição (4) garante que a quantidade total de ambulâncias alocadas nas bases de veículos precisa respeitar o valor máximo definido. Essa restrição permite a distribuição otimizada das ambulâncias entre as bases de veículos, eliminando a chance de solicitar um número maior de ambulâncias que estejam de fato disponíveis. O conjunto de Restrições (5) garante que a capacidade de cada base, em relação a quantidade de pacientes, seja respeitada. Essa capacidade é definida pela divisão do número total da população nos pontos de demanda pelo número total de ambulâncias ( $\sum \alpha_i / P$ ).

O conjunto de Restrições (6) garante que a quantidade máxima de pontos de demanda por base será respeitada. A Restrição (7) garante que novas bases serão abertas quando o número mínimo de bases de veículos existentes for satisfeito. Desta forma, a variável binária  $a$  assume o valor 1 quando o número de bases existente é maior que o mínimo requisitado. A Restrição (8) afirma que novas bases de veículos de resgate podem ser abertas até um valor máximo disponível. O conjunto de Restrições (9) garante que todas as bases abertas terão ambulâncias e atenderão os pontos de demanda, e o conjunto de Restrições (10) garante que o número máximo de veículos em cada base deve ser respeitado.

O conjunto de Restrições (11) foi definido com base nos estudos de Marianov e Serra (1998 e 2002), onde os autores consideram uma restrição sobre a qualidade do serviço em cada ponto de atendimento, em termos de tempo de espera ou número de clientes na fila. Supondo que as solicitações de serviço em cada nó de demanda  $i$  possam ser representados por distribuição de Poisson com frequência  $f_i$  e que cada base de serviço  $j$  atende a um conjunto de nós de demanda, os pedidos de atendimento nessa base podem ser definidos como a união dos pedidos dos nós servidos. Assim, o processo de chegada das demandas em  $j$  pode ser representado por uma distribuição de Poisson com frequência  $\lambda_j$ , sendo que este parâmetro é igual à soma das frequências dos processos ( $f_i$ ) dos nós servidos. Entretanto, este conjunto de nós é desconhecido até que o problema de programação matemática seja resolvido. No entanto, pode-se usar as variáveis  $x_{ij}$  para reescrever o parâmetro  $\lambda_j$  como (Equação 19):

$$\lambda_j = \sum_{i \in I} f_i x_{ij}. \quad (19)$$

Tendo a restrição do tempo de espera como aquele que garante a qualidade do serviço prestado (nível de serviço), é possível usar a função cumulativa de probabilidade de tempo de espera para um modelo de fila do tipo M/M/m dada por Bhat (2008) apresentada pela Equação 20 (sem perda de generalidade, considere agora  $\lambda_j$  igual a  $\lambda$ ):



$$P(T_q > t) = \frac{r^m p_0}{m!(1-\rho)} e^{-m\mu(1-\rho)t} \quad (20)$$

onde  $t$  é o tempo de espera que não pode ser excedido com uma probabilidade  $\pi$ . Após substituir  $p_0$  (probabilidade do sistema está vazio), tem-se uma expressão  $P(T_q > t)$  que depende somente das variáveis  $m, \lambda, \mu$  e  $t$ . Então,  $1 - P(T_q > t)$  deve ser maior ou igual a  $\pi$ , ou seja,  $P(T_q > t) \leq 1 - \pi$ . Infelizmente, essa desigualdade não é linear e não é possível derivar algebricamente uma expressão linear para  $\lambda$ . No entanto, o lado esquerdo desta desigualdade representa o tempo acumulado de espera. No intervalo de interesse ( $\lambda/m\mu \leq 1$ ), o tempo acumulado de espera deve ser estritamente uma função crescente de  $\lambda$ , dado o significado físico desta variável. Por isso, um parâmetro  $\lambda_\pi$  pode ser considerado de modo que os valores de  $\lambda \leq \lambda_\pi$  para a relação  $P(T_q > t) \leq 1 - \pi$  seja verdadeira. Uma vez que  $\lambda_\pi$  pode ser calculada, uma restrição linear pode ser descrita como apresentada em (Equação 21):

$$\sum_{i \in I} f_i x_{ij} \leq \lambda_{\pi j} \quad (21)$$

A Expressão (21) por sua vez dá origem ao conjunto de Restrições (11) do modelo proposto. Neste conjunto de restrições são incorporados os valores de  $\lambda_{\pi j}$  que fazem com que as bases recebam a melhor quantidade possível de veículos de resgate de acordo com a sua capacidade, onde  $C_j$  é o conjunto que representa quantidades de veículos possíveis de serem alocadas em cada base e  $\Gamma_{cj}$  garante que somente a melhor quantidade de veículos seja usada em cada base. O conjunto de Restrições (12) garante que a quantidade de ambulâncias alocadas a cada base deve ser compatível com a sua capacidade de alocação, e o conjunto de Restrições (13) garante que os veículos de uma determinada base terão alocação de veículos caso esteja aberta. As demais Restrições (14), (15), (16), (17) e (18) estão relacionadas aos domínios das variáveis de decisão.

#### 4. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS COMPUTACIONAIS

O presente estudo aborda um problema de localização de bases de veículos de emergência na Zona Oeste do Rio de Janeiro, mostrado na Figura 3. Essa região foi escolhida por compreender a maior área do município do Rio de Janeiro, abrigando 41 bairros, com uma grande demanda por serviços de emergência. O mapa foi elaborado com o auxílio do *software* QGIS 3.16.

Após análise investigativa, foram identificadas 22 bases na Zona Oeste que atualmente prestam serviço de resgate de emergência e 4.190 setores censitários que necessitam de atendimento a partir de 40 ambulâncias. Ao todo, essa região abriga uma população de 2.616.870 pessoas, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE referente ao último censo de 2010.

Para cálculo do tempo decorrido no transporte e, conseqüentemente da área de cobertura de cada base, neste estudo foi adotado um fator de redução de velocidade a fim de considerar os impactos do trânsito congestionado no serviço médico de urgência. Este fator consiste na relação entre o índice de tempo de viagem em congestionamentos e a percepção de retardo na movimentação, relatada em entrevista com motoristas do

Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU). Sendo assim, foi usado como base o estudo elaborado por Lima et al. (2019), que diz que no Rio de Janeiro há um acréscimo de 71% no tempo de viagem de carros convencionais em horários de pico, valor este obtido através do Índice de Tempo de Viagem (ITV) que é um meio de monitoramento da mobilidade urbana que permite calcular a média de atrasos nos deslocamentos. Com o objetivo de entender o impacto direto do congestionamento das vias nos serviços médicos de urgência, entrevistas a condutores de ambulâncias relataram uma redução de 20% na velocidade do veículo em horários críticos da via.



Figura 3. Setores Censitários e bases de resgate atuais – Zona Oeste.

Para as definições das frequências  $f_i$ , foi utilizado um multiplicador para a população de cada setor censitário em questão. Este multiplicador consiste na razão entre a quantidade de atendimentos realizados em um período pelo SAMU no município do Rio de Janeiro e sua a população.

A taxa de atendimento média  $\mu_j$  foi considerada constante em todos os pontos de atendimento e a sua composição leva em consideração o tempo de deslocamento de até 10 minutos acrescido do tempo de atendimento no local e do transporte para a unidade de saúde.

O modelo matemático aplicado para a Região Oeste do Rio de Janeiro possui 7538 variáveis, sendo 7516 binárias e 22 inteiras, distribuídas em 9951 restrições.

Os cenários planejados para o experimento consistem em, variando-se a taxa de atendimento  $\mu$ , avaliar a porcentagem da população que deve ser atendida com uma espera de no máximo  $t$  horas, com uma probabilidade  $\pi$ .

Para realização dos experimentos utilizou-se um computador com processador Intel® i7-8565U (dispondo de quatro *cores* e oito *threads*) 1.80GHz, 24Gb de memória RAM SODIMM 2400 MHz e disco SSD NVMe Intel® 512Gb, rodando o *solver* Gurobi® 9.5.2 build v9.5.2rc0, executado no sistema operacional Microsoft® Windows 10 de 64 Bits.

Os experimentos computacionais foram limitados a um tempo de solução máximo de 1800 segundos, com isso, foram encontrados resultados ótimos para poucos cenários. Os *gaps* de otimalidade encontrados variaram entre 0 e  $2,8 \times 10^{-3}\%$ , conforme mostrado na Tabela 3.

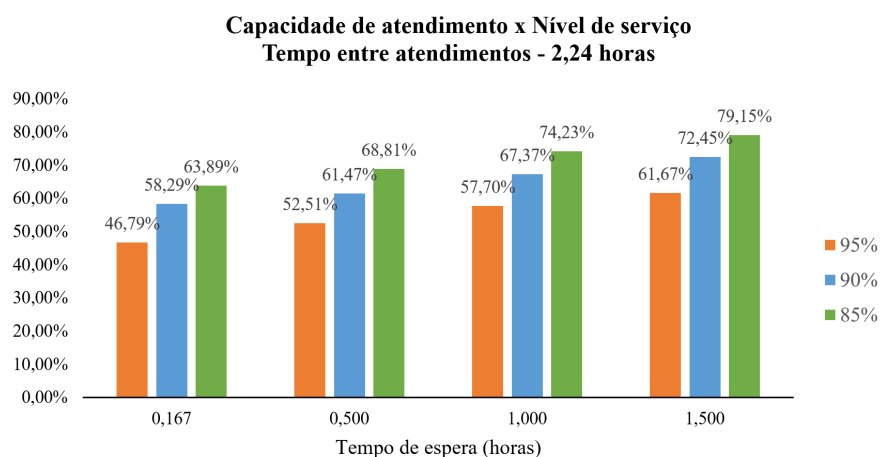
**Tabela 3:** *Gaps* dos experimentos computacionais

$\mu$	$\pi$	Tempo de espera (t)			
		0,167 h	0,5 h	1,0 h	1,5 h
2,000	95%	0,0058%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
	90%	0,0000%	0,0002%	0,0000%	0,0000%
	85%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
1,000	95%	0,0002%	0,0001%	0,0028%	0,0013%
	90%	0,0001%	0,0004%	0,0000%	0,0001%
	85%	0,0003%	0,0006%	0,0000%	0,0000%
0,446	95%	0,0002%	0,0002%	0,0000%	0,0004%
	90%	0,0001%	0,0005%	0,0004%	0,0000%
	85%	0,0004%	0,0002%	0,0000%	0,0026%

Observa-se ainda nos experimentos que, se desconsideradas as restrições que se referem ao nível de serviço ofertado, a instância proposta só é capaz de atender 2.351.712 habitantes (89,98% da população total da região), principalmente pela existência de setores censitários inacessíveis ou que não são atendidos dentro de um deslocamento de 10 minutos, bem como pela combinação entre a capacidade de atendimento de cada veículo de resgate, que no caso do estudo é a relação entre a população total e a quantidade de ambulâncias, e a distribuição populacional dos setores censitários.

Com relação à capacidade de atendimento e o nível de serviço, foram utilizadas as probabilidades de atendimento de 95%, 90% e 85%, bem como os tempos médios de atendimento de 0,5, 1,0 e 2,24 horas, sendo este último indicador considerado o tempo médio real de um atendimento realizado pelo SAMU no ano de 2015 (ou seja,  $\mu \cong 0,446$  atendimentos/hora).

Como tempo de espera de um usuário pelo serviço, considerou-se os tempos de 0,167 (10 minutos que é o tempo desejável máximo de espera pelo serviço de emergência), 0,5, 1,0 e 1,5 horas.



**Figura 4.** Capacidade de atendimento  $\times$  Nível de serviço, para  $\mu = 0,446$ .

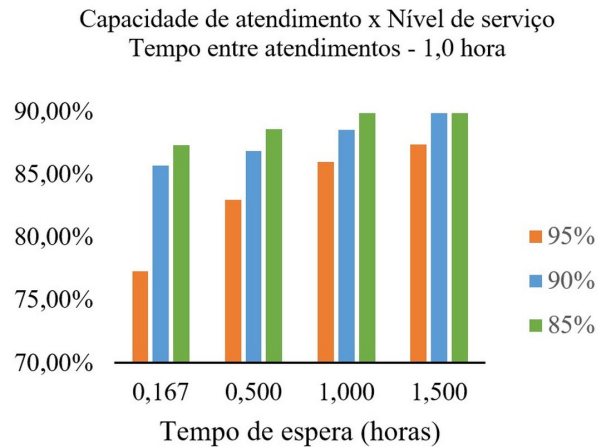


Figura 5. Capacidade de atendimento × Nível de serviço, para  $\mu = 1$ .

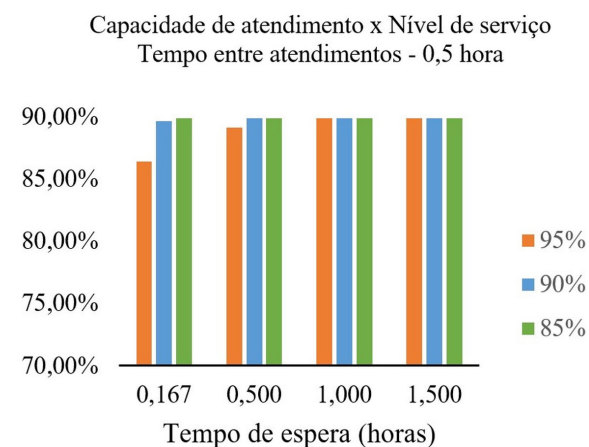


Figura 6. Capacidade de atendimento × Nível de serviço, para  $\mu = 2$ .

Pode-se perceber na análise do cenário mais próximo do atual (Figura 4) que mesmo com uma esperança de 85%, o sistema só consegue garantir o atendimento de pouco mais de 60% da população com até 10 minutos de espera. Na hipótese de atendimentos efetuados com mais rapidez, a situação melhora (Figuras 5 e 6), chegando ao ápice do sistema quando é alcançado  $\mu = 2$  atendimentos por hora (Figura 6). Com esta taxa de atendimento, há a probabilidade de 90% de que 89,87% da população seja atendida em até 10 minutos.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

O presente artigo, além de ser uma contribuição acadêmica importante, devido à baixíssima quantidade de trabalhos encontrados na literatura que abordem simultaneamente a localização de facilidades voltadas ao melhor posicionamento de bases de veículos de resgate que levam em consideração o nível de serviço ofertado ao cliente, trouxe uma relevante contribuição em três áreas distintas. A primeira delas está relacionada ao planejamento público do sistema de saúde, já que os resultados do estudo permitem a criação de novas políticas e processos que podem ser desenvolvidos para aprimorar a operação dos veículos de resgate. Em segundo lugar, o artigo abordou questões socioeconômicas, permitindo uma compreensão mais aprofundada sobre o assunto, e a proposição de medidas para garantir que a população seja atendida de forma

efetiva, o que pode ser fundamental para a manutenção da vida e para a redução de sequelas. Por último, mas não menos importante, o artigo apresentou e aplicou um modelo matemático para solucionar o problema da localização, levando em consideração a probabilidade de espera em uma fila.

De fato, é possível observar que o modelo matemático proposto é uma ferramenta de avaliação importante para os serviços de resgate de emergência, pois permite analisar o nível de serviço oferecido aos usuários. O modelo utilizou conceitos dos trabalhos apresentados por Ferrari (2017) e de Marianov e Serra (1998, 2002), tendo por finalidade maximizar a cobertura de áreas que necessitam de atendimento de emergência garantindo o nível de serviço adequado ao usuário desse serviço crítico. Desta forma foram utilizados parâmetros e restrições que se aproximam da realidade atual do Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU) na Zona Oeste do Rio de Janeiro que abriga mais de 30 bairros, sendo considerada uma das maiores regiões do Estado do Rio de Janeiro.

Neste estudo, abordou-se a importância de uma distribuição de bases eficiente, bem como da qualidade do serviço prestado pelo SME de um modo geral, que seja capaz de atender o máximo da demanda obedecendo um nível de serviço adequado, visto que os impactos de um atendimento ágil refletem diretamente na chance de sobrevivência do indivíduo que espera pelo socorro. A partir das análises computacionais realizadas na seção anterior, observa-se a importância da maximização do atendimento levando-se em conta os parâmetros de formação de filas. Desta forma, é possível determinar qual a configuração mais adequada da rede de atendimento por meio do processo de decisão auxiliado pelo modelo matemático e suas restrições, neste caso, os fatores de importância levaram em consideração a prioridade de atendimento à população combinado com o respeito ao nível de serviço adequado.

A configuração de redes logísticas para serviços de emergência é uma questão estratégica de extrema importância. As variações de tempo, distância, quantidade de recursos disponíveis e o nível de serviço ofertado são fatores primordiais para que uma operação que envolve vidas humanas seja realizada com sucesso.

De acordo com a instância utilizada e a consulta aos materiais que serviram de apoio teórico para a formulação deste artigo, observa-se com muita clareza os efeitos negativos da configuração subdimensionada e da baixa qualidade da prestação do serviço no nível de serviço ofertado à população.

O problema analisado no cenário atual mostra-se incapaz de atender em tempo hábil, com probabilidades altas (acima de 85%) e taxa de atendimento de 0,446 a demanda por atendimentos. Uma hipótese a ser estudada no futuro é o impacto da aquisição de novos veículos de resgate, bem como a possibilidade da abertura de novas bases de veículos para melhorar o do nível de serviço, no caso de não ser possível implementar a redução no tempo de atendimento médio, que se configura em outra hipótese a ser considerada. Por fim, como limitação desse estudo, citamos a base de dados utilizada, referente ao último censo de 2010 do IBGE.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aringhieri, R.; M.E. Bruni; S. Khodaparasti et al. (2017) Emergency medical services and beyond: Addressing new challenges through a wide literature review, *Computers & Operations Research*, v. 78, p. 349-68. DOI: 10.1016/j.cor.2016.09.016.

- Bélanger, V.; Y. Kergosien; A. Ruiz et al. (2016) An empirical comparison of relocation strategies in real-time ambulance fleet management, *Computers & Industrial Engineering*, v. 94, p. 216-29. DOI: 10.1016/j.cie.2016.01.023.
- Bhat, U.N. (2008) *An introduction to queueing theory: modeling and analysis in applications*. Boston: Birkhäuser. DOI: 10.1007/978-0-8176-4725-4.
- Birkle, C.; D.A. Pendlebury; J. Schnell et al. (2020) Web of Science as a data source for research on scientific and scholarly activity, *Quantitative Science Studies*, v. 1, n. 1, p. 363-76. DOI: 10.1162/qss\_a\_00018.
- Castañeda, P.C. e G.J. Villegas (2016). Analyzing the response to traffic accidents in Medellín, Colombia, with facility location models, Colombia, International Association of Traffic and Safety Transportation. *IATSS Research Journal*, v. 41, pp. 47-56.
- Daskin, M.S. e L.K. Dean (2004) Location of health care facilities. In Operations Research and Health Care (eds.). *The Handbook of OR/MS in Health Care: A Handbook of Methods and Application*. Boston, MA: Springer US, p. 43-76.
- Farahani, R.Z.; S. Fallah; R. Ruiz et al. (2019) OR models in urban service facility location: A critical review of applications and future developments, *European Journal of Operational Research*, v. 276, n. 1, p. 1-27. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.07.036. PMID:35874494.
- Ferrari, T. (2017). *Modelagem Matemática para Localização de Bases de Veículos de Veículos de Resgate: Um Estudo de Caso no Município do Rio de Janeiro*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. RJ. Disponível em: <<https://pet.coppe.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes/2017/111-modelagem-matematica-para-localizacao-de-bases-de-despacho-de-veiculos-de-resgate-um-estudo-de-caso-no-municipio-do-rio-de-janeiro>>. (acesso em 08/05/2023).
- Klose, A. e A. Drexl (2005) Facility location models for distribution system design, *European Journal of Operational Research*, v. 162, n. 1, p. 4-29. DOI: 10.1016/j.ejor.2003.10.031.
- Krüger, A.J.; E. Skogvoll; M. Castrén et al. (2010) Scandinavian pre-hospital physician-manned Emergency Medical Services - Same concept across borders, *Resuscitation*, v. 81, n. 4, p. 427-33. DOI: 10.1016/j.resuscitation.2009.12.019. PMID:20122784.
- Li, X.; Z. Zhao; X. Zhu et al. (2011) Covering models and optimization techniques for emergency response facility location and planning: A review. *Mathematical Methods of Operations Research*, v. 74, n. 3, p. 281-310. DOI: 10.1007/s00186-011-0363-4.
- Lima, G.C.L.S.; L.C. Brizon; J.C. Dutra et al. (2019) *Objetivos de Política para a Promoção da Mobilidade Sustentável*. Disponível em: <<https://ceri.fgv.br/publicacoes/objetivos-de-politica-para-promocao-da-mobilidade-sustentavel>> (acesso em 08/05/2023).
- Marianov, V. e D. Serra (2002) Location-allocation of multiple-server service centers with constrained queues or waiting times. *Annals of Operations Research*, v. 111, n. 1, p. 35-50. DOI: 10.1023/A:1020989316737.
- Marianov, V.E. e D. Serra (1998) Probabilistic, maximal covering location-allocation models for congested systems, *Journal of Regional Science*, v. 38, n. 3, p. 401-24. DOI: 10.1111/0022-4146.00100.
- 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. 2, n. 196, p. 401-12. DOI: 10.1016/j.ejor.2008.05.007.
- Repede, J.F. e J.J. Bernardo (1994) Developing and validating a decision support system for locating emergency medical vehicles in Louisville, Kentucky. *European Journal of Operational Research*, v. 75, n. 3, p. 567-81. DOI: 10.1016/0377-2217(94)90297-6.
- Revelle, C.S. e K. Hogan (1989) The maximum availability location problem. *Transportation Science*, v. 23, n. 3, p. 192-200. DOI: 10.1287/trsc.23.3.192.
- Şahin Macit, M. (2015) *An Integrated Optimization and Simulation Approach for the Ambulance Location Problem*. Dissertação (mestrado), Middle East Technical University, Ankara. Disponível em: <<http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12619705/index.pdf>> (acesso em 08/05/2023).
- Toregas, C.R.; R. Swain; C.S. Revelle et al. (1971) The location of emergency service facilities. *Operations Research*, v. 19, n. 6, p. 1363-73. DOI: 10.1287/opre.19.6.1363.
- WHO (2005) *Prehospital Trauma Care Systems*. Geneva: WHO. Disponível em: <<https://www.who.int/publications-detail-redirect/prehospital-trauma-care-systems>> (acesso em 08/05/2023).