



PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO E ALOCAÇÃO DE CENTROS DE ESPECIALIDADES MÉDICAS NO ESTADO DE MINAS GERAIS

Tamara de Melo Sathler, Samuel Vieira Conceição, João Flávio Almeida, Luiz Ricardo Pinto

Universidade Federal de Minas Gerais - Departamento de Engenharia de Produção
Avenida Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil
tamaramelsat@gmail.com, {svieira, joao.flavio, luiz} @dep.ufmg.br

Francisco Carlos Cardoso de Campos

Universidade Federal de Minas Gerais - Núcleo de Educação em Saúde Coletiva
Av. Alfredo Balena 190, Santa Efigênia, CEP 30130-100, Belo Horizonte, MG, Brasil
cardoso@nescon.medicina.ufmg.br

Gilberto Miranda Júnior

Universidade Federal do Espírito Santo - Centro Universitário Norte do Espírito Santo
Rodovia Governador Mário Covas, CEP 29932540, São Mateus, ES, Brasil
gilbertomirandajr@gmail.com

RESUMO

Esse trabalho abordou sobre a saúde pública no Estado de Minas Gerais, relacionada ao atendimento de demandas por especialidades médicas. Os autores propuseram um modelo matemático de otimização para localização e alocação de Centros de Especialidades Médicas (hospitais de média complexidade) em Minas Gerais. O modelo foi adaptado dos clássicos problemas de Localização da Máxima Cobertura propostos na Pesquisa Operacional. Os resultados encontrados caracterizaram como ferramenta de análise e de apoio à decisão para a equipe multidisciplinar da pesquisa, composta por engenheiros, médicos e governo. Foram abordadas a partir dos resultados também, análises considerando o cenário atual de crise econômica para a otimização dos recursos no planejamento da saúde pública.

PALAVRAS CHAVE. Localização de Facilidade, Pesquisa Operacional, Setor Público de Saúde.

Tópicos (PO na Área de Saúde)

ABSTRACT

This study focused on public health in the State of Minas Gerais, related to the attendance of medical specialties demands. The authors proposed a mathematical location and allocation optimization model of specialized medical centers (hospitals of medium complexity) in Minas Gerais. The model was adapted from the classic Maximal Covering Location Problem proposed in the Operational Research. The results were characterized as an analysis tool and decision support for the multidisciplinary research team, formed by engineers, physicians and government. From the results were approached also, analyzes considering the current scenario of economic crisis for resources optimization in the public health planning.

KEYWORDS. Facility Location, Operational Research, Public Healthcare.

Paper topics (OR in Health)



1. Introdução

A localização de instalações constitui fator estratégico fundamental para os diversos tipos de organizações, seja ela pública ou privada, de prestação de serviços como hospitais e ambulâncias, instalações físicas, como um centro de distribuição, uma fábrica ou armazém. Os problemas de localização, de forma geral, consistem em localizar certo número de facilidades em um dado espaço geográfico, de forma a atender os pontos de demandas ou clientes distribuídos nesse espaço, bem como alocar os clientes às facilidades abertas. Esses tipos de problemas são classificados como NP-difícil, limitando a resolução de instâncias de grande porte por métodos exatos [Garey e Johnson, 1979]. Há várias décadas o problema de localização é foco de estudo e vem recebendo diferentes enfoques. Na área da saúde tornam-se cada vez mais necessários e de forte apelo social e econômico, pois visam tomadas de decisões de longo prazo, e que irão afetar a população e a rede de saúde já existente por um longo período de tempo.

Acesso aos serviços de saúde é direito universal e igualitário de todo cidadão, e que por isso merece a atenção do Estado quanto à alocação de recursos. Problemas de localização na área da saúde buscam responder questões como: Onde localizar hospitais de forma a atender com maior nível de qualidade a maioria da população? Quantos hospitais ou ambulâncias são necessários para o atendimento da população? Quantas horas médicas devem ser contratadas? Como alocar os atendimentos médicos nas diversas cidades de um Estado? Questões de extrema relevância para obtenção de um bom planejamento orçamentário, e de atendimento da população de forma mais igualitária e com qualidade.

Devido a grande aplicabilidade, os problemas de localização caracterizam-se por possuir diferentes objetivos relevantes, constituindo diversas abordagens e problemas pertinentes no setor de saúde. Conforme especificado na Resolução SES/MG 5063, de 09 de dezembro de 2015, deseja-se nesse trabalho localizar 51 Centros de Especialidades Médicas (CEMs) em 853 municípios do Estado de Minas Gerais, e em cinco especialidade médicas: cardiologia, pediatria, mastologia, ginecologia e endocrinologia, determinando o município de localização e como será feita a alocação da demanda em cada uma dessas especialidades de cada município. Para isso, o trabalho baseia-se no modelo de localização de máxima cobertura ou *Maximal Covering Location Problem* (MCLP). O MCLP tem como objetivo maximizar a demanda coberta dos diversos municípios, dado um número pré-definido de facilidades a serem abertas e uma distância máxima de deslocamento até a facilidade aberta de modo a ser considerado um ponto de demanda coberto [Fo e da Silva Mota, 2012].

A motivação do estudo de localização se dá pela importância da boa gestão pública e da relevância do problema para a comunidade da pesquisa operacional (PO). Após realização de buscas na literatura percebe-se escassez e a raridade de trabalhos com atuação real na PO no Brasil. Segundo [Drezner e Hamacher, 2004] os problemas de localização são geralmente difíceis de serem resolvidos, principalmente quando o número de variáveis aumenta, não possuindo um modelo geral de aplicação, sendo portanto específicos a cada caso. Assim, a principal contribuição do trabalho é à literatura através da proposta de um novo modelo com aplicação de um problema real, além do apelo social que o problema aborda.

Para melhor abordagem do artigo, as próximas seções serão organizadas de seguinte forma. A seção 2 apresenta uma revisão da literatura destacando alguns trabalhos relevantes de localização-alocação no setor de saúde. A seção 3 apresenta o problema e o método proposto. A seção 4 apresenta o modelo matemático. Na seção 5 os experimentos computacionais e os resultados encontrados, bem como a tomada de decisão sugerida. E finalmente, na seção 6 são apresentadas as conclusões e propostas de futuros trabalhos.

2. Revisão de Literatura

Problemas com análise de localização de facilidades tem importância reconhecida há alguns anos, já quando se considerava como fatores determinantes do desenvolvimento econômico o preço das terras e custos com transporte entre os locais de produção e consumo [Bowersox, 2001].



Com o passar do tempo, o tema foi inserido no conceito de integração logística tornando um fator determinante na competitividade das empresas.

Entende-se pelo termo facilidades, todo tipo de instalações físicas, como um centro de distribuição (CD), antenas, escolas, hospitais, ambulâncias, entre outros. O problema pode ser caracterizado por uma rede contendo vértices, representando as facilidades e pontos de demanda, com arestas que ligam os vértices, que representam as alocações das demandas de cada ponto a uma facilidade aberta, caracterizando o problema de localização como também de alocação.

Diversos trabalhos abordando modelos de localização podem ser encontrados na literatura, como alguns clássicos contendo uma revisão geral do tema com características dos problemas, instâncias, desenvolvimento de métodos exatos e heurísticos, entre outros [Geoffrion e Powers, 1995], [Owen e Daskin, 1998]. Bem como aqueles que surgiram a partir das diferentes aplicações em contextos reais como, disponibilidade de recursos materiais e pessoais, questões orçamentárias, sociais, ambientais e físicas, serviços de utilidade pública entre outros fatores [Yin e Mu, 2012], [Karatat et al., 2016].

Essas diferentes aplicações levaram a diversas formas de classificações do modelo de localização, como por exemplo, em relação ao tipo de modelo matemático, divididos em problemas baseados na Cobertura, e na Mediana. Os modelos de Cobertura de acordo com [Ahmadi-Javid et al., 2016] são classificados em três tipos: modelos de cobertura de conjunto (introduzido por Toregas et al. [1971]), que visa determinar o número mínimo de instalações e as localizações de forma a atender toda a demanda; os modelos de máxima cobertura (introduzido por [Church e ReVelle, 1974]), que maximiza o atendimento da demanda, dado número fixo de facilidades; e o p -Centro (introduzido por Hakimi [1964]), que busca minimizar a máxima distância entre o ponto de demanda e de uma facilidade mais próxima. Os problemas baseados na Mediana, são classificados em dois principais: o modelo da p -Medianas (introduzido por Hakimi [1964], Hakimi [1965]), que tem como objetivo localizar um número pré determinado de p facilidades de forma a minimizar a distância ponderada total entre o ponto de demanda e a facilidade; e o *Fixed Charge Facility Location Problem* (introduzido por Erlenkotter [1978]), que tem por objetivo a minimização do custo total de abertura de uma facilidade e de deslocamento.

O problema da máxima cobertura (MCLP), tem como objetivo localizar p facilidades de forma a maximizar a cobertura da demanda a partir de um número máximo de facilidades e de uma distância máxima de cobertura. Uma demanda é considerada coberta se essa estiver dentro da distância máxima de cobertura previamente estabelecida. Ainda, esse é um modelo caracterizado por ser sensível a demanda, uma vez que alguns nós podem não ser atendidos devido a necessidade de um número maior de facilidades a serem abertas. O MCLP é um dos modelos mais utilizados no setor público de saúde devido às restrições orçamentárias existentes a medida que maximiza a cobertura da população dado um limite fixo de facilidades.

No setor de saúde, abordagem contendo problemas de MCLP encontra-se em [Oppong, 1996]. Por limites de recursos existentes em contextos reais, os problemas de MCLP vêm sendo amplamente utilizados no planejamento de localização de facilidades de emergência na forma capacitada (CMCLP) (introduzida por [Current e Storbeck, 1988]). Na saúde preventiva, [Zhang et al., 2012] estudam o impacto do comportamento de escolha do paciente por um programa de atendimento médico na configuração da rede de saúde. E a medida que surge a preocupação com o tempo de atendimento, [Jia et al., 2007] revisam os modelos de localização de serviços de emergência, como a localização de ambulâncias [Indriasari et al., 2010], [Van Barneveld et al., 2015]. [Syam e Côté, 2012] investigam as condições de incertezas geográficas na localização de facilidades.

Outros problemas de localização são tratados na forma multiobjetivo como em [Zahiri et al., 2014], para configurar uma rede de transplante de órgãos. [Guerriero et al., 2016] discutem o problema de reorganização da rede de serviços de saúde enfrentado pelo governo italiano e propõe o MCLP e demais modelos de otimização, para apoiar o processo de tomada de decisão. Por último, [Davari et al., 2016] abordam o problema de programação inteira mista para projetar



uma rede de cuidados preventivos de saúde considerando restrições orçamentárias, e tendo como objetivo a maximização da acessibilidade dos serviços aos usuários. Exemplos recentes de trabalhos publicados em serviços de saúde que utilizaram o MCLP, podem ser encontrados também em [Shariff et al., 2012], [Lim et al., 2016], [Van den Berg et al., 2016].

3. Metodologia: Estudo de Caso

Em um projeto de grande magnitude, que envolve a SES-MG, a Escola de Medicina e de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), e o governo, pretende implantar 51 CEMs no Estado de Minas Gerais. Dessa forma, o estudo de caso consiste em localizar e alocar esses CEMs no Estado de Minas Gerais de forma a maximizar atendimento da demanda por especialidade médica, cobrindo todo o Estado. O número p de CEMs (51), foi definido de acordo com o limite orçamentário imposto à SES-MG.

Cada CEM atende a população por meio de cinco especialidades médicas: Cardiologia, Pediatria, Ginecologia, Endocrinologia, e Mastologia. Tais especialidades foram escolhidas por serem as que possuem maior demanda por atendimento no Estado, de acordo com dados históricos. A demanda por horas médicas em cada especialidade é estabelecida pela portaria 1631, de 01 de outubro de 2015, do Ministério da Saúde, ou seja, de acordo com o número de habitantes de cada município. Dessa forma, a cada 100.000 habitantes são necessários, 6,5 médicos para cardiologia, endocrinologia 1,5, ginecologia 25, pediatria 25, e mastologia 1. A população de cada município, foi obtida pela equipe de demografia do projeto a partir da projeção do último censo (2010) do Instituto Brasileiro de Geografia e estatística (IBGE) para os municípios de Minas Gerais em 2015.

O número obtido para demanda (em horas médicas) é relativo à demanda total, representada pela atenção básica (Unidades básicas de Saúde), atenção secundária (hospitais de média complexidade) e atenção terciária (hospitais de alta complexidade) a saúde. Assim foi estabelecido em alinhamento com a SES-MG que será considerado a estimativa de 50% desta demanda para o problema proposto, por se tratar apenas do nível de atenção secundária, representada por hospitais de média complexidade que atendem demandas das especialidades abordadas no trabalho.

De maneira conceitual, o objetivo do problema consiste em maximizar o somatório da demanda por atendimento de especialidades médicas. Tal objetivo surge a partir da busca por um atendimento igualitário da população do Estado de Minas Gerais, dado que muitos pacientes não possuem atendimento de especialidade no local em que vivem, devendo se locomover para pontos de atendimentos em outras cidades. Dessa forma, a partir da demanda por atendimento, e das distâncias a serem percorridas até os pontos candidatos a receber um CEM, é possível estimar qual a melhor configuração de localização dos CEMs e de alocação das demandas.

O método de resolução do problema é pela formulação de um modelo de otimização linear inteira mista (PLIM). O estudo foi analisado por meio de três cenários: no primeiro, todos os municípios são candidatos a receber um CEM; no segundo, são candidatos a receber um CEM, os municípios que possuem produção aferida em três ou mais especialidades acima citadas; no terceiro, são candidatos a receber um CEM, os municípios que possuem produção aferida em três ou mais especialidades, e população maior que 30.000 habitantes.

A divisão em três cenários, justifica-se pela análise do efeito da modificação do conjunto de candidatos na caracterização da configuração da rede resultante, e para tornar o problema mais adequado à realidade, pois verifica-se maior tendência à localização desse tipo de facilidade em municípios preparados estruturalmente. A definição por 3 especialidades ou mais é decorrente da análise de que municípios com histórico de produção aferida em mais de 50% das especialidades, estão aptos ou melhores estruturados a receber um CEM. O banco de dados do Sistema Único de Saúde foi consultado para obtenção da produção aferida, em horas médicas. O valor de 30.000 habitantes foi definido após a verificação, através de testes computacionais, de que valores superiores (50.000 e 60.000) exclui do conjunto de candidatos municípios regionalmente importantes. Já a adoção de valores menores que 30.000 dispersa o propósito de encontrar candidatos preparados



estruturalmente. O método de [Fo e da Silva Mota, 2012] foi utilizado como referência para o desenvolvimento do novo modelo para o problema em questão, considerando as seguintes restrições:

- Os CEMs devem ser localizados apenas nos municípios candidatos.
- A demanda por especialidade médica de cada município deve ser alocada a apenas 1 CEM.
- Devem ser instalados no máximo 51 CEMs.
- As demandas devem ser alocadas somente aos CEMs abertos.
- A demanda do município que receber um CEM, deve ser alocada à aquele CEM.

4. Modelo Matemático

O problema de programação linear inteira mista foi construído a partir do Problema de Localização de Facilidades Não Capacitado de Máxima Cobertura. A notação utilizada neste trabalho é apresentada a seguir.

Conjuntos	
I	: Pontos de demandas por atendimento médico.
J	: Candidatos a receberem um CEM.
E	: Especialidades médicas.
S_i	: Locais candidatos a atender um ponto de demanda $i \in I$, $S_i = \{j \in J : DIST_{ij} \leq DIST_{max}\}$.
Parâmetros	
DEM_{ie}	: Demanda por atendimento especializado e do município i . (horas\semana)
$DIST_{ij}$: Distância entre o município i e o município j . (km)
$CAND_j \in \{0, 1\}$: 1, se o município possui produção em três ou mais especialidades, 0, caso contrário. (binário)
p	: Número de CEMs a serem abertos. (unidade)
POP	: População de cada município. (unidade)
POP_{MIN}	: Número mínimo de habitantes para ser considerado um município candidato. (unidade)
$DIST_{max}$: Distância máxima de deslocamento entre um município e o CEM. (km)
LTO_i	: Latitude do município i origem. (graus, min e seg)
LTD_i	: Latitude do município j destino. (graus, min e seg)
LGO_i	: Longitude do município i origem. (graus, min e seg)
LGD_j	: Longitude do município j destino. (graus, min e seg)
FC	: Fator de correção. (unidade)
DC_{ij}	: Distância circular. (unidade)
Variáveis	
$x_{ije} \in \{0, 1\}$: 1, se a demanda do município i pela especialidade e será atribuída ao município j , 0, caso contrário.
$y_j \in \{0, 1\}$: 1, se o CEM será instalado no município j , 0, caso contrário.

O modelo matemático proposto, é formulado da seguinte maneira:

$$\text{Max } Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{e \in E} DEM_{ie} x_{ije} \quad (1)$$

sujeito a :

$$\sum_{j \in S_i} x_{ije} \leq 1 \quad \forall i \in I, e \in E \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} y_j = p \quad (3)$$

$$x_{ije} - y_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in S_i, e \in E \quad (4)$$

$$x_{jje} - y_j = 0 \quad \forall i \in I, j \in S_i, e \in E \quad (5)$$

$$x_{ije} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in S_i, e \in E \quad (6)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (7)$$



A função objetivo Z , maximiza o somatório da demanda coberta. Uma demanda é considerada coberta quando encontra-se a uma distância menor ou igual a distância máxima de um CEM aberto. O conjunto de CEMs que podem atender a demanda de uma cidade é representado por S_j . Para análise de sensibilidade foi adotado quatro valores diferentes de distância máxima: 400, 300, 200 e 100 quilômetros. Essa análise tem por intuito verificar a melhor distribuição dos CEMs em todo o Estado, e a escolha dos valores para variação desse parâmetro se deu pelo tamanho do Estado de Minas Gerais e com base em estudos previamente realizados.

A restrição (2) considera que, cada especialidade e de cada município j deve ser atendida por algum município, não sendo necessário que toda a demanda seja atendida. A restrição (3) impõe limite de instalação de p CEMs. A restrição (4) garante que, a demanda da especialidade e do município i , deve ser alocada apenas aos CEMs j abertos. A restrição (5) determina que, os municípios que possuem um CEM devem alocar a demanda para ele. As variáveis do problema x_{ije} e y_j representadas pelas restrições (6) e (7) são do tipo binária. Essa formulação inicial traz a abordagem do primeiro cenário, no qual não há imposições para que um município seja candidato.

O segundo cenário, considera candidatos apenas os municípios que possuem produção aferida em 3 ou mais especialidades. Para isso, a restrição (8) abaixo é acrescentada ao modelo:

$$CAND_j \geq y_j \quad \forall j \in J \quad (8)$$

Para a adoção do terceiro cenário acrescenta-se a restrição (9), ou seja, um município só pode ser escolhido a receber um CEM se possuir 30.000 habitantes ou mais.

$$POP_j \geq POPMIN y_j \quad \forall j \in J \quad (9)$$

A distância entre o município origem e o município destino é obtida pelo cálculo da distância entre dois pontos de acordo com a lei esférica dos cossenos (11) e (12), e aplicando-se a fórmula (10) com um fator de correção (FC) aproximado. O fator de correção, foi obtido após média realizada entre as distâncias reais e a distância com a lei esférica dos cossenos para um conjunto de municípios do Estado de Minas Gerais. O alto valor encontrado justifica-se pela geografia do Estado, que caracteriza-se por muitas regiões planas e montanhosas. As informações de latitude e longitude foram obtidas no banco de dados do IBGE.

$$DIST_{ij} = DC_{ij} FC \quad (10)$$

Onde:

$$DC_{ij} = (1)(6371) \tan^{-1}(\sqrt{\alpha_{ij}}, \sqrt{1 - \alpha_{ij}}) \quad (11)$$

$$\alpha = \sin \left[\frac{\pi}{180} \left(\frac{LTO_i - LTD_j}{2} \right) \right]^2 + \quad (12)$$

$$\cos \frac{\pi}{180}(LTO_i) \cos \frac{\pi}{180}(LTD_j) \sin \left[\frac{\pi}{180} \left(\frac{LGO_i - LGD_j}{2} \right) \right]^2$$

5. Experimentos e Resultados

O primeiro cenário, possui 853 municípios candidatos a receber um CEM. O segundo, 372 municípios candidatos possuem produção aferida em 3 ou mais especialidades. O terceiro e último, resulta em 98 municípios candidatos a receberem um CEM, com produção aferida em 3 ou mais especialidades e com mais de 30.000 habitantes.

Em cada cenário varia-se o parâmetro distância máxima, assumindo os valores de 400, 300, 200, e 100 quilômetros (km). Essa variação busca identificar a configuração, ou distribuição dos CEMs no Estado de Minas Gerais e alocações obtidas, que fornece maior cobertura e ao mesmo tempo resulta em menor distância média de deslocamento. Pode-se afirmar que, quanto menor a distância a ser percorrida, menor o custo com deslocamento e maior conforto e tranquilidade para o paciente, porém deve-se avaliar em conjunto, a melhor cobertura, ou seja, a que fornece acesso à saúde à maioria.



Nesse trabalho foram executados quatro experimentos para cada cenário, totalizando 12 experimentos, em um computador de sistema operacional *Windows 64 bits* com o processador *Intel(R) Core(TM) i7-6700U* com *3,40GHz* e *16GB* de memória *RAM*. Utilizou-se a linguagem de programação matemática e os software *AMPL* e *CPLEX* para execução do problema.

A tabela (1) apresenta os resultados obtidos no primeiro cenário. Verifica-se um tempo de processamento relativamente baixo para as três maiores distâncias quando comparado a 100 km, evidenciando o aumento do grau de dificuldade na obtenção da resposta. A demanda foi totalmente coberta em todos os casos (100% de cobertura), a distância média entre um CEM e a demanda é de aproximadamente 60% da distância máxima. A alocação da demanda, apresenta a porcentagem da maior e da menor demanda alocada a um único CEM. Obtendo nos casos de maior distância máxima (300 e 400 km), elevada concentração em um único CEM (42, 17% e 30, 8%), enquanto a menor alocação (0, 01%) busca atender a demanda do próprio município.

Tabela 1: Resultados Cenário 1

Cenário	Dist. Máx. (km)	Tempo (seg.)	Cobertura (%)	Dist. Média (km)	Aloc. Dem. (%)
1	100	3168	100	60,8	13,5 - 0,04
	200	152	100	121,4	13,6 - 0,06
	300	343	100	175,7	30,8 - 0,01
	400	120	100	247,5	42,17 - 0,01

As figuras (1a), (1b), (1c), e (1d) apresentam a distribuição geográfica dos CEMs no Estado de Minas Gerais obtida para as quatro distâncias de cobertura do primeiro cenário. Pode-se observar a concentração dos CEMs em municípios de regiões populosas, representados pelas maiores demandas, exceto para 100 km, que obteve boa dispersão geográfica dos CEMs. As distâncias máximas de 300 e 400 quilômetros obtiveram o mesmo resultado para localização dos CEMs, mas diferente para a alocação. E como demonstrado nos resultados da tabela 1, adotar a solução para distância de 100 km nesse cenário seria uma boa opção dado que a demanda foi 100% coberta. Porém para esse configuração, os CEMs localizam-se em municípios pequenos, com menos de 15.000 habitantes, na maioria deles.

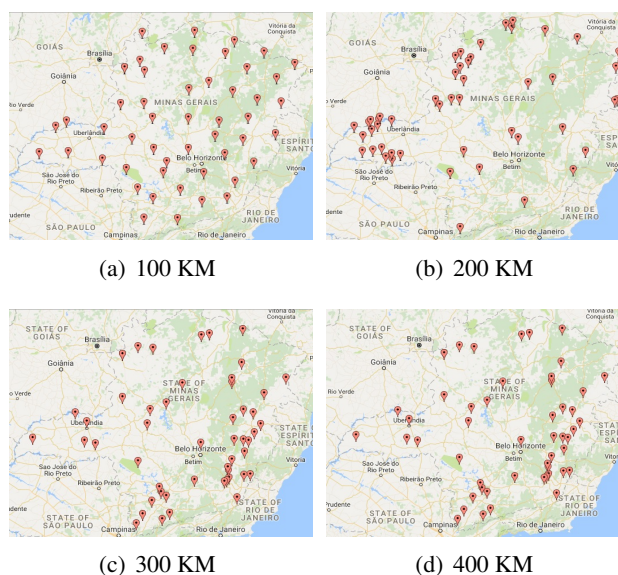


Figura 1: Cenário 1: localização ótima dos 51 CEMs para 4 alternativas de cobertura máxima

Os resultados do segundo cenário são apresentados na tabela (2). Verifica-se aumento no tempo de processamento com a diminuição da distância e apenas para a menor distância, a demanda total não foi coberta, atingindo 99.25%. As distâncias médias assim como no cenário 1, variam em



torno de 60% da respectiva distância máxima de cobertura, e a alocação da demanda assim como no cenário 1, é melhor distribuída entre os CEMs para a distância máxima de 100 km, mas concentrada para 400 km, com 56,8% da demanda atribuída à um único CEM. Concluindo-se que, considerar valores elevados para distância máxima além de aumentar o deslocamento do paciente, tende a alocar o atendimento em centros com alta concentração de demanda.

Tabela 2: Resultados Cenário 2

Cenário	Dist. Máx. (km)	Tempo (seg.)	Cobertura (%)	Dist. Média (km)	Aloc. Dem. (%)
2	100	4269	99,25	59,6	19,21 - 0,15
	200	3768	100	119,2	13,6 - 0,25
	300	180	100	182,8	20 - 0,08
	400	71	100	225,1	56,8 - 0,01

Pelas figuras (2a), (2b), (2c), e (2d), a distribuição espacial dos CEMs caracteriza-se pela descentralização para as menores distâncias de coberturas (100 e 200 km). Sendo que, a maioria dos municípios escolhidos possuem população maior que 15.000 habitantes, resultado da restrição adicionada.

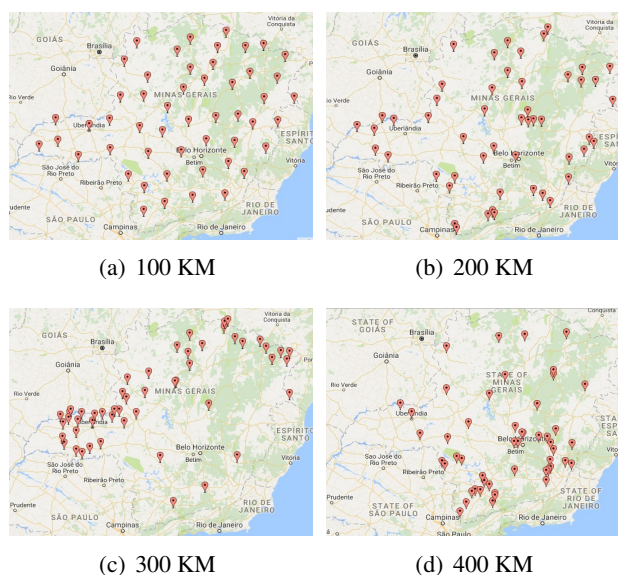


Figura 2: Cenário 2: localização ótima dos 51 CEMs para 4 alternativas de cobertura máxima

Os resultados do terceiro cenário são apresentados na tabela (3). Pode-se concluir que há diminuição nos tempos de execução quando comparado aos demais cenários, e efeito contrário em relação ao aumento no tempo de execução com diminuição da distância máxima. O que justifica-se pela inserção da nova restrição, que reduziu a busca por locais candidatos. Porém observa-se ainda que, para a distância de 100 e de 200 quilômetros a demanda não é totalmente coberta. Assim como nos demais casos, a distância média se mantém em aproximadamente 60% da respectiva distância máxima. Em relação a alocação, com aumento da distância, poucos CEMs concentram altas demandas, como no caso de 400 km, em que apenas um CEM é responsável por 49,9% da demanda variando para os demais 50, alocação menor que 1%.

Analisando as distribuições dos CEMs pelas figuras (3a), (3b), (3c), e (3d), nota-se uma configuração mais concentrada na região central e sul de Minas Gerais, onde encontram-se os municípios mais populosos e desenvolvidos do Estado, que além de possuírem 30.000 habitantes ou mais, possuem na maioria deles, mais de 50.000 habitantes.



Tabela 3: Resultados Cenário 3

Cenário	Dist. Máx. (km)	Tempo (seg.)	Cobertura (%)	Dist. Média (km)	Aloc. Dem. (%)
3	100	4	95,63	60,9	8,2 - 0,3
	200	8	99,95	123,5	11,8 - 0,84
	300	10	100	173,6	26,8 - 0,3
	400	16	100	230,14	49,9 - 0,19

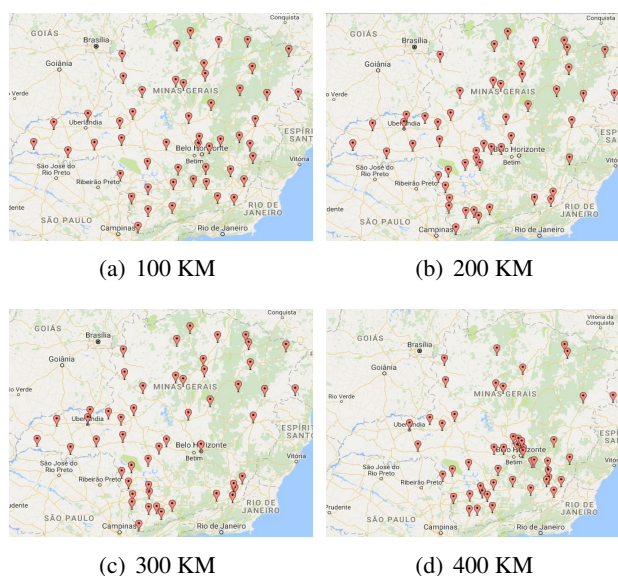


Figura 3: Cenário 3: localização ótima dos 51 CEMs para 4 alternativas de cobertura máxima

Os resultados obtidos em cada um dos cenários mostram que, com a menor distância de cobertura (100 km), os usuários deslocam em média 60 quilômetros, a configuração de alocação da demanda é a melhor obtida, sendo boa parte ou toda a demanda atendida. O que se justifica pela distribuição geográfica mais descentralizada decorrente do valor da distância máxima.

Ao adotar 100 km, a demanda é totalmente coberta apenas no cenário 1, o que representa uma boa opção, mas que se torna inviável ao analisar os municípios escolhidos, que caracterizam-se por serem pequenos em termos populacionais, e que por isso não comportariam uma instalação da dimensão proposta pelo problema, considerando fatores econômicos, políticos e estruturais.

O cenário 2, apesar do maior tempo de execução para 100 km, conseguiu alcançar 99.25% da cobertura, baixa média de deslocamento, e uma configuração da rede mais adequada à realidade do problema comparado ao cenário 1, uma vez que resultou em escolha de municípios localizados em regiões mais populosas.

Os resultados obtidos no cenário 3 apresentam ser mais completos, pois além de englobarem em 100% os municípios considerados aptos a receber um CEM, por serem maiores e desenvolvidos, o modelo forneceu a solução em tempo hábil quando comparado aos demais cenários. A demanda coberta é satisfatória, de aproximadamente 96%, fornecendo aos municípios menores acesso em tempo razoável aos serviços de saúde, apesar da distribuição geográfica obtida de maior concentração no centro-sul do Estado. A tabela (4) apresenta as localizações obtidas para os 51 CEMs do cenário 3, para 100 km.

Em cenário de crise econômica financeira, é priorizado a redução de custos nas diversas esferas do governo. Com isso, pode-se aprofundar o estudo realizando análises no cenário 3, definido como a opção que mais condiz com a realidade do contexto do trabalho. Assim, primeiramente o objetivo é encontrar a menor distância máxima que fornece 100% de cobertura da demanda, com



Tabela 4: Localização 51 CEMs Cenário 3, 100 km

Item	Cidade	Item	Cidade
1	Além Paraíba	27	Lavras
2	Alfenas	28	Manhuaçu
3	Almenara	29	Matozinhos
4	Araçuaí	30	Montes Claros
5	Araguari	31	Muriaé
6	Araxá	32	Nanuque
7	Barbacena	33	Oliveira
8	Boicauva	34	Paracatu
9	Bom Despacho	35	Patos de Minas
10	Caeté	36	Patrocínio
11	Capelinha	37	Pirapora
12	Caratinga	38	Piumhi
13	Conselheiro Lafaiete	39	Poços de Caldas
14	Curvelo	40	Pouso Alegre
15	Diamantina	41	Ribeirão das Neves
16	Extrema	42	São Francisco
17	Frutal	43	São João Del Rei
18	Gov. Valadares	44	São Lourenço
19	Ipatinga	45	São Sebas. do Paraíso
20	Itabira	46	Taiobeiras
21	Ituitaba	47	Teófilo Otoni
22	Iturama	48	Uberaba
23	Janauba	49	Unaí
24	Januária	50	Várzea de Palma
25	João Pinheiro	51	Viçosa
26	Juiz de Fora		

p igual a 51. Logo, variando o valor de $DIST_{max}$ foi encontrado 250 quilômetros. A partir desse valor, a segunda análise é reduzir o valor de p , buscando encontrar o menor possível que mantém a cobertura em 100%. Dessa forma, além de atender toda a demanda pode-se propor redução de custo, com a diminuição dos custos fixos de instalação e manutenção de um CEM. Como resultado obteve-se que, para p até 12 ou mais, 100% da demanda por especialidade médica é atendida, abaixo desse valor a demanda é parcialmente coberta.

A análise de redução no número de facilidades mantendo a quantidade de demanda atendida é relevante em termos de custos. Porém há que se considerar a capacidade de atendimento ou tamanho do CEM, taxa de chegada dos pacientes, congestionamento, entre outros fatores que podem levar ao baixo nível de qualidade do atendimento. Como por exemplo, para o ponto crítico de 12 CEMs, obteve-se uma distribuição da alocação da demanda de aproximadamente 26% para o maior CEM e 1,5% para o menor. O que significa possuir um único CEM responsável em atender mais de um quarto da demanda, necessitando para isso, elevada capacidade, infraestrutura local, disponibilidade de equipe médica, e de equipamentos. Dessa forma, pode ser avaliado durante o processo decisório, a busca por um valor de p entre 12 e 51, que proporcione um bom nível de atendimento e ao mesmo tempo resulte em otimização de recursos a partir da redução de p .

6. Conclusões

Problemas reais de localização-alocação são aplicados e tratados pela pesquisa operacional (PO) abordando metodologias e técnicas de solução, porém são escassos e raros na literatura com atuação na saúde e no Brasil. Nesse sentido, foi desenvolvido um modelo matemático de localização-alocação baseado no modelo da Máxima Cobertura para definir os 51 municípios que devem receber um CEM. Para abordagem do estudo, variou-se o valor da distância máxima em quatro valores (400, 300, 200 e 100 km), e foi estabelecido três cenários que definiam o conjunto de municípios candidatos a receber um CEM.



As variações adotadas, permitiram concluir que os 51 CEMs foram geograficamente bem distribuídos para as menores distâncias de cobertura máxima, em todos os cenários. Ao desconsiderar restrições de municípios candidatos, como no cenário 1, obteve 100% da demanda atendida em todos valores de distância máxima, o que não ocorreu nos demais cenários. O cenário 1, adotando 100 km, apresentou ser a solução ideal. Porém, foi certificado que as localizações concentraram-se em municípios menores, o que não condiz com o contexto real quando esse tipo de decisão é tomada. Sendo melhor adotar, nesse sentido, os resultados do cenário 3.

Em relação a alocação da demanda, em todos os cenários, para os maiores valores de distância máxima há alocação do atendimento da demanda a CEMs localizadas em regiões populosas do Estado, por isso a elevada concentração da demanda em um único CEM. Tal análise deve ser abordada em trabalhos futuros considerando a oferta máxima de cada CEM, desenvolvendo o modelo na forma Capacitada para melhor adequação a realidade, considerando a disponibilidade de horas médicas em cada região de saúde do Estado.

Análises considerando o contexto atual de crise econômica financeira, foram realizadas adotando o cenário 3. Concluindo-se que pode haver diminuição de custos reduzindo o número de CEMs a serem instalados sem perder em cobertura da demanda, e avaliando até que ponto essa é uma boa opção considerando o nível do serviço prestado. Por fim, nota-se a importância desse tipo de estudo para uma boa gestão pública, e como ferramenta de auxílio a tomada de decisão para melhoria da qualidade do serviço público de saúde.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Universidade Federal de Minas Gerias (UFMG) pelo suporte financeiro para desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- Ahmadi-Javid, A., Seyedi, P., e Syam, S. S. (2016). A survey of healthcare facility location. *Computers & Operations Research*.
- Bowersox, D. J. (2001). Logística empresarial: o processo de integração da cadeia de suprimento/donald j. *Bowersox, David J. Closs*.
- Church, R. e ReVelle, C. (1974). The maximal covering location problem. In *Papers of the Regional Science Association*, volume 32, p. 101–118. Springer.
- Current, J. R. e Storbeck, J. E. (1988). Capacitated covering models. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 15(2):153–163.
- Davari, S., Kilic, K., e Naderi, S. (2016). A heuristic approach to solve the preventive health care problem with budget and congestion constraints. *Applied Mathematics and Computation*, 276: 442–453.
- Drezner, Z. e Hamacher, H. W. (2004). *Facility Location: Applications and Theory*. Springer Science & Business Media.
- Erlenkotter, D. (1978). A dual-based procedure for uncapacitated facility location. *Operations Research*, 26(6):992–1009.
- Fo, A. e da Silva Mota, I. (2012). Optimization models in the location of healthcare facilities: a real case in brazil. *Journal of Applied Operational Research*, 4(1):37–50.
- Garey, M. R. e Johnson, D. S. (1979). Computers and intractability: a guide to the theory of np-completeness. 1979. *San Francisco, LA: Freeman*, 58.



- Geoffrion, A. M. e Powers, R. F. (1995). Twenty years of strategic distribution system design: An evolutionary perspective. *Interfaces*, 25(5):105–127.
- Guerriero, F., Miglionico, G., e Olivito, F. (2016). Location and reorganization problems: The calabrian health care system case. *European Journal of Operational Research*, 250(3):939–954.
- Hakimi, S. L. (1964). Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations research*, 12(3):450–459.
- Hakimi, S. L. (1965). Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems. *Operations Research*, 13(3):462–475.
- Indriasari, V., Mahmud, A. R., Ahmad, N., e Shariff, A. R. M. (2010). Maximal service area problem for optimal siting of emergency facilities. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(2):213–230.
- Jia, H., Ordóñez, F., e Dessouky, M. (2007). A modeling framework for facility location of medical services for large-scale emergencies. *IIE transactions*, 39(1):41–55.
- Karatas, M., Razi, N., e Tozan, H. (2016). A comparison of p-median and maximal coverage location models with q-coverage requirement. *Procedia Engineering*, 149:169–176.
- Lim, J., Claypool, E., Norman, B. A., e Rajgopal, J. (2016). Coverage models to determine outreach vaccination center locations in low and middle income countries. *Operations Research for Health Care*, 9:40–48.
- Oppong, J. R. (1996). Accommodating the rainy season in third world location-allocation applications. *Socio-Economic Planning Sciences*, 30(2):121–137.
- Owen, S. H. e Daskin, M. S. (1998). Strategic facility location: A review. *European journal of operational research*, 111(3):423–447.
- Shariff, S. R., Moin, N. H., e Omar, M. (2012). Location allocation modeling for healthcare facility planning in malaysia. *Computers & Industrial Engineering*, 62(4):1000–1010.
- Syam, S. S. e Côté, M. J. (2012). A comprehensive location-allocation method for specialized healthcare services. *Operations Research for Health Care*, 1(4):73–83.
- Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C., e Bergman, L. (1971). The location of emergency service facilities. *Operations Research*, 19(6):1363–1373.
- Van Barneveld, T., Bhulai, S., e Van der Mei, R. (2015). A dynamic ambulance management model for rural areas. *Health care management science*, p. 1–22.
- Van den Berg, P., Kommer, G., e Zuzáková, B. (2016). Linear formulation for the maximum expected coverage location model with fractional coverage. *Operations Research for Health Care*, 8:33–41.
- Yin, P. e Mu, L. (2012). Modular capacitated maximal covering location problem for the optimal siting of emergency vehicles. *Applied Geography*, 34:247–254.
- Zahiri, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Mohammadi, M., e Jula, P. (2014). Multi-objective design of an organ transplant network under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 72:101–124.
- Zhang, Y., Berman, O., e Verter, V. (2012). The impact of client choice on preventive healthcare facility network design. *OR spectrum*, 34(2):349–370.