

# LOCALIZAÇÃO DE MAMÓGRAFOS: UM ESTUDO DE CASO NA REDE PÚBLICA DE SAÚDE

**Victor Hugo Vidigal Corrêa, Bruno Jhonatan Costa Lima, Pedro Henrique Silva-e-Souza, Puca Huachi Vaz Penna, Marcone Jamilson Freitas Souza**

Departamento de Computação, Escola de Medicina, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)  
Campus Universitário, Morro do Cruzeiro, CEP 35400-000, Ouro Preto (MG), Brasil

{victor.correa.ufop, lima.bjc}@gmail.com

{puca, marcone}@ufop.edu.br

Departamento de Medicina, Universidade Federal de Rondônia (UNIR)

Campus José Ribeiro Filho, BR 364, km 9,5 Bloco 2C, CEP 76801-059, Porto Velho (RO), Brasil

pedrohenriquesilvaesouza@gmail.com

## RESUMO

Este trabalho trata o Problema de Alocação de Mamógrafos, que consiste em alocar um conjunto de mamógrafos a um conjunto de locais, assim como designar locais de atendimento para cada mamógrafo, de forma a atender um certo critério de otimização, respeitando-se uma distância máxima de deslocamento. Foram desenvolvidas quatro formulações de programação linear inteira, tendo como objetivo principal minimizar a distância total. Na primeira, a restrição de distância é rígida; enquanto na segunda, permite-se violá-la, sendo essa violação minimizada na função objetivo. A terceira e quarta formulações diferem das duas primeiras apenas com relação à função objetivo, que, neste caso, inclui a quantidade de mulheres que se deslocam. As quatro formulações foram aplicadas a instâncias adaptadas da literatura e a instâncias reais para mostrar que elas podem apoiar os gestores de saúde na tomada de decisão com relação à uma distribuição mais adequada dos mamógrafos existentes.

**PALAVRAS CHAVE.** *Alocação de Mamógrafos, Localização de facilidades capacitada, Programação linear inteira*

## ABSTRACT

This work deals with the Mammography Equipment Allocation Problem, which consists in allocating a set of mammography units to a set of cities, as well as designating service locations for each equipment, respecting a maximum service distance. The primary objective considered in this work is to minimize the total distance between the cities with this equipment and those served by it. Four formulations of integer linear programming were developed. In the first, the distance constraint must be obeyed; while in the second, it is possible to violate it, and this violation is minimized. The third and fourth formulations differ from the first two only about the objective function, which, in these cases, include the number of women moving. These formulations have been applied to instances adapted from the literature and to real-world instances to show that they can support health managers in decision-making regarding an adequate distribution of existing equipment.

**KEYWORDS.** *Location of Mammography Equipment, Capacitated facility location, Integer linear programming*

## 1. Introdução

Com o avanço das especialidades na área da medicina, cria-se um grande volume de conhecimento sobre os problemas de saúde que afetam os seres humanos. Em consequência, são desenvolvidas diversas técnicas para combater e prevenir essas complicações. Porém, de nada adianta ter técnicas disponíveis para prevenção e tratamento se a população não consegue, por motivos de logística, alcançá-las. Este é um desafio que precisa ser enfrentado para possibilitar o acesso da população às inovações da área, principalmente as relacionadas à prevenção de doenças.

Conforme relatado em INCA [2015a], o câncer de mama é o tipo de câncer mais prevalente entre as mulheres no mundo e no Brasil, depois do câncer de pele não melanoma, respondendo por cerca de 28% dos casos novos a cada ano. A doença é relativamente rara em idades inferiores a 35 anos com progressão da incidência após essa faixa, em especial após os 50 anos, sem predileção por países subdesenvolvidos ou desenvolvidos.

Xavier et al. [2016] mostraram que o rastreamento da doença por meio do exame de mamografia é o principal meio de detecção precoce dessa neoplasia maligna. Desta forma, a diminuição de óbitos na população feminina por essa causa está intimamente relacionada ao diagnóstico precoce desse mal.

Amaral et al. [2017], no entanto, observaram que há um baixo grau de utilização dos aparelhos de mamografia no Brasil. Segundo a pesquisa feita por esses autores, o número de aparelhos existentes, cuja capacidade de atendimento anual por aparelho é de 5.069 exames segundo o Instituto Nacional do Câncer [INCA, 2015b], é suficiente para atendimento da demanda nacional. Apesar disso, essa demanda não é atendida, dada a falta de mão de obra especializada e a má distribuição geográfica dos aparelhos.

Andrade et al. [2016] destacam que é fundamental realizar estudos para otimizar a distribuição dos mamógrafos, visto que a distância que a mulher precisa percorrer até o local onde está instalado o mamógrafo para atendê-la é o fator que mais contribui para que as mulheres deixem de realizar o exame. Isto é, muitas mulheres não realizam os exames de mama simplesmente porque os mamógrafos estão instalados em lugares distantes de onde elas residem.

Em vista dessa situação, este trabalho tem por objetivo estudar o Problema de Alocação de Mamógrafos (PAM) e verificar se é possível uma distribuição mais racional dos mamógrafos existentes, tendo como estudo de caso a distribuição geográfica dos mamógrafos disponíveis na rede pública de saúde das cidades que compõem as regiões de saúde em um raio de 100 km da cidade de Ouro Preto, Minas Gerais, excetuando-se a cidade de Belo Horizonte. Na distribuição atual, há pelo menos uma cidade que fica a mais de 60 km de um local onde está instalado um mamógrafo, que é o caso da cidade de Desterro de Entre Rios. Além disso, nas cidades de Betim e Ibirité os mamógrafos instalados são insuficientes para atender a toda a demanda feminina, fazendo com que parte dessa população fique, na prática, sem o atendimento nos níveis recomendados. Portanto, a resolução adequada desse problema pode contribuir para o aumento no número de mulheres que se previnem contra o câncer de mama e para a otimização dos recursos do Sistema Único de Saúde (SUS).

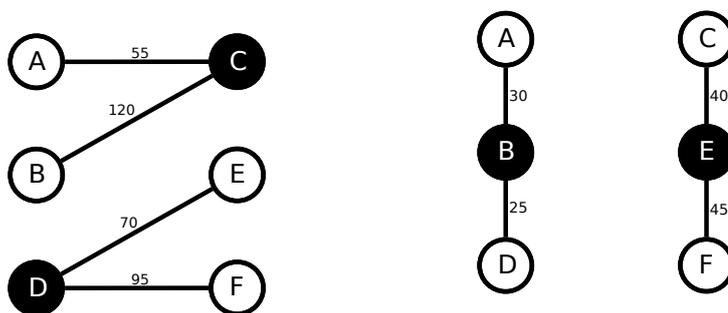
## 2. Descrição do problema

O Problema de Alocação de Mamógrafos (PAM) é um problema de distribuição espacial que visa a obtenção de uma melhor disposição de mamógrafos no espaço geográfico de forma a propiciar às mulheres melhor facilidade de acesso ao exame de mamografia.

Para defini-lo, seja um conjunto de  $n$  localidades e um conjunto de  $p < n$  mamógrafos, cada qual com sua respectiva capacidade de atendimento  $cap_j$ . O PAM consiste em distribuir esses  $p$  mamógrafos entre essas  $n$  localidades, de forma que a localidade na qual cada mamógrafo será instalado esteja a no máximo 60 km (ou 60 minutos) de qualquer localidade a ser atendida [Brasil, 2015], minimizando-se um certo critério de otimização. Entre esses, pode-se desejar minimizar a distância total entre todas as localidades atendidas e seus respectivos locais de atendimento. Outro

critério de interesse pode ser minimizar a quantidade de pessoas se deslocando de um local até o ponto de atendimento. Na Seção 4 são apresentados quatro critérios de otimização.

A Figura 1 ilustra duas situações de instalação de dois mamógrafos em duas de seis possíveis cidades (A, B, C, D, E e F). Na Figura 1a, mostra-se que os dois mamógrafos foram instalados nas cidades C e D, e que o mamógrafo instalado na cidade C atende aos clientes das cidades A, B e o próprio C; enquanto o mamógrafo instalado na cidade D atende aos clientes dessa própria localidade, bem como os clientes E e F. A distância total na primeira proposta de localização é 320 unidades de distância ( $= 35 + 120 + 70 + 95$ ). Por sua vez, na Figura 1b, mostra-se uma outra alocação, cuja distância total é menor, no caso, 140 unidades de distância ( $= 30 + 25 + 40 + 45$ ).



(a) Primeira proposta de localização

(b) Segunda proposta de localização

Figura 1: Ilustração da localização de 2 mamógrafos dentre 6 possíveis localidades

### 3. Revisão da literatura

Durante a revisão da literatura não foram identificados estudos que tratassem o PAM de forma a propor soluções para a sua resolução por meio de modelos de programação matemática. Assim, foram revisados trabalhos que faziam análise do problema, assim como trabalhos que trataram outros problemas de distribuição geográfica de equipamentos com o intuito de, a partir das metodologias propostas na literatura, desenvolver uma solução para o PAM.

De acordo com estudos realizados em Xavier et al. [2016], 2,6% dos óbitos femininos são causados em decorrência do câncer de mama e o seu principal meio de detecção é pelo exame de mamografia. Somente no período entre 2009 e 2013 ocorreram 65.695 óbitos no Brasil em decorrência do câncer de mama, sendo que 41.490 (63%) óbitos foram na faixa etária de 40 a 69 anos. Os autores observaram, também, que o número de mamógrafos é suficiente para atendimento da demanda; contudo, por fatores como falta de mão de obra especializada e má distribuição dos aparelhos, o acesso ao exame é desigual.

Segundo Amaral et al. [2017], o Brasil possui um excesso de oferta de mamógrafos de 11,1%, quando consideram-se somente os equipamentos disponíveis pelo SUS e um excesso de 147,9% quando são considerados também os mamógrafos disponíveis na rede privada de saúde.

Em Andrade et al. [2016] foram entrevistadas 5.726 mulheres residentes no estado de Minas Gerais e para extração de informações dessas entrevistas foi realizada uma modelagem por meio do modelo *logit*. Na metodologia empregada pelos autores foi necessário o cálculo da tupla mulher/mamógrafo, em que a mulher fosse associada ao mamógrafo mais próximo dela. Foi utilizado um método exaustivo na determinação de todas as tuplas, ou seja, todas as possíveis combinações de tuplas foram calculadas até se obter a resposta desejada. Após ter todas as tuplas que minimizam a distância entre esses pares, foi calculado, com auxílio da ferramenta *Google Maps Distance Matrix*

*API*, o tempo que a mulher deve se deslocar até o mamógrafo considerando o deslocamento feito por carro particular. Com esses resultados aplicados ao modelo *logit*, foi possível a conclusão de que a distância entre os locais de moradia das mulheres e os locais de instalação dos mamógrafos que deveriam atendê-las é um dos fatores que mais contribuem para a baixa aderência do público-alvo ao exame.

Em estudo realizado pelo Instituto Nacional do Câncer [INCA, 2009], foi feita uma análise estatística das ocorrências do câncer de mama e elaborado um guia para que gestores públicos gerenciem os procedimentos preventivos da doença que devem ser disponibilizados para a população alvo do exame. Desse estudo foram extraídos por Xavier et al. [2016] os parâmetros para cálculo de demanda para os exames de mamografia, que ficaram estabelecidos em 20% das mulheres de 40 a 49 anos e 58,9% das mulheres de 50 a 69 anos.

Aplicações de problemas de localização de facilidades à área de saúde têm aumentado na literatura recente. Por exemplo, em Jardim e Conceição [2004] é tratado o problema de localização de unidades de resgate na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais. Este problema consiste em determinar os locais ideais para posicionamento de unidades de resgate tendo como base a incidência média de acidentes nas regiões que compõem a cidade. Os autores fizeram uma formulação de *p*-medianas capaz de atender as restrições impostas pelo problema e a testaram usando o software *Logware* com o módulo P-MED para resolvê-lo. Para obtenção de dados para aplicação do modelo, foram realizadas visitas técnicas à base operacional do Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU) para identificar o volume de ocorrências de resgates nas zonas que dividem a cidade.

Em de Melo Sathler et al. [2017] é proposto um modelo de programação linear inteira mista para determinar a localidade de 51 Centros de Especialidade Médicas (CEM) no Estado de Minas Gerais. O modelo escolhido pelos autores foi o de localização de máxima cobertura que tem por objetivo maximizar a demanda coberta pelos municípios do Estado, dado um número fixo de facilidades a serem abertas. Na metodologia empregada, os autores consideraram que cada CEM atende a população por meio de cinco especialidades médicas definidas como sendo aquelas com maior demanda no Estado. Também definiram a demanda por horas médicas de acordo com os parâmetros recomendados pelo Ministério da Saúde para cada especialidade médica considerada e a população de cada município foi obtida pelos dados do censo demográfico de 2010 realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Foram considerados três cenários: o primeiro considera que todas as cidades são candidatas receberem um CEM; o segundo, que possuem já produção de pelo menos três das especialidades médicas consideradas e o terceiro, que considera que somente cidades com população maior do que 30.000 habitantes são candidatas a receberem um CEM. Nos experimentos conduzidos para cada cenário, foi variado o parâmetro que delimita a distância máxima de deslocamento entre um município e o CEM em 4 valores com o intuito de verificar qual configuração é possível ter uma maior cobertura de serviços. Os resultados obtidos mostraram que a configuração considerando o primeiro cenário e a menor distância de deslocamento obteve maior concentração de CEMs em municípios menores, não refletindo corretamente a realidade. De acordo com os autores, o melhor resultado a ser adotado na atual situação econômica do país seria aquele que considera o cenário 3 com o limite de distância de 100 km de deslocamento. Nesse cenário houve 95,63% de cobertura, uma distância média de deslocamento de 60,9 km e uma distribuição geográfica dos CEMs homogênea por todo o território do Estado.

#### **4. Formulações desenvolvidas**

São apresentadas, a seguir, quatro formulações de programação linear inteira para o PAM. A primeira consiste na inserção, no clássico modelo do problema das *p*-medianas, de uma restrição de distância entre cada localidade e o local de instalação dos mamógrafos. A segunda formulação, por sua vez, consiste em admitir que essa restrição de distância possa não ser atendida, caso o número de mamógrafos disponíveis seja insuficiente para contemplar essa restrição. Na terceira e quarta formulações, por sua vez, é levado em consideração a quantidade de mulheres se deslocando.

A quarta formulação difere da terceira por também admitir que haja deslocamento que não respeite a distância máxima.

Além dessas quatro formulações, também apresentamos, na Seção 4.4, uma formulação para determinar o número mínimo de mamógrafos para uma dada instância.

#### 4.1. Formulação 1

A formulação 1 é uma pequena modificação do modelo base do problema das  $p$ -medianas descrito em Soares [2009]. Para apresentá-lo, sejam os parâmetros de entrada e variáveis de decisão, conforme definidos a seguir.

Parâmetros:

$d_{ij}$  = distância do local  $j$  ao local  $i$

$q_j$  = demanda de exames no local  $j$

$cap_i$  = capacidade de atendimento de exames do mamógrafo instalado no local  $i$

$p$  = número de mamógrafos a serem alocados

$R$  = distância máxima imposta entre o local de instalação de um mamógrafo e o local de atendimento

$N$  = Conjunto das localidades

Variáveis de decisão:

$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se as mulheres do local } j \text{ são atendidas por algum mamógrafo instalado no local } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

$y_i$  = quantidade de mamógrafos a serem instalados no local  $i$

Assim, a formulação 1 para o PAM pode ser apresentada conforme as equações (1a) a (1h) a seguir:

$$\text{minimize } \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} x_{ij} \quad (1a)$$

$$\text{subject to } \sum_{i \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N, \quad (1b)$$

$$y_i \geq x_{ij} \quad \forall i, j \in N, \quad (1c)$$

$$\sum_{i \in N} y_i = p, \quad (1d)$$

$$\sum_{j \in N} q_j x_{ij} \leq cap_i y_i \quad \forall i \in N, \quad (1e)$$

$$d_{ij} x_{ij} \leq R \quad \forall i, j \in N, \quad (1f)$$

$$x_{i,j} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N, \quad (1g)$$

$$y_i \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in N \quad (1h)$$

A função objetivo (1a) minimiza o somatório das distâncias entre o local em que um mamógrafo é instalado e a localidade atendida por ele. As restrições (1b) indicam que cada mulher só pode ser associada a um local onde tenha um mamógrafo. As restrições (1c) impedem que uma mulher seja atendida em uma localidade sem mamógrafo. As restrições (1d) obrigam a alocação de  $p$  mamógrafos. As restrições (1e) indicam que não pode ser violada a capacidade de exames de um mamógrafo. As restrições (1f) impõem o limite máximo, indicado pelo parâmetro  $R$ , para o deslocamento que a mulher pode fazer para a realização do exame. Finalmente, as restrições (1g) e (1h) impõem o domínio das variáveis de decisão.

## 4.2. Formulação 2

A formulação 2 contém as mesmas variáveis de decisão e parâmetros da formulação 1, acrescidas dos seguintes parâmetros e variáveis:

Parâmetros:

$\alpha$  = penalidade por ultrapassar a distância máxima imposta entre o local de instalação de um mamógrafo e os locais a serem atendidos

Variáveis de decisão:

$dp_{ij}$  = Desvio positivo de distância, que mensura o quanto a localidade  $j$  ultrapassa a distância máxima permitida até o local  $i$  em que está instalado um mamógrafo

Essa formulação representa o PAM conforme as equações (2a) a (2h) a seguir:

$$\text{minimize} \quad \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} x_{ij} + \alpha \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} dp_{ij} \quad (2a)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{i \in N} x_{i,j} = 1 \quad \forall j \in N, \quad (2b)$$

$$y_i \geq x_{ij} \quad \forall i, j \in N, \quad (2c)$$

$$\sum_{i \in N} y_i = p, \quad (2d)$$

$$\sum_{j \in N} q_j x_{ij} \leq \text{cap}_i y_i \quad \forall i \in N, \quad (2e)$$

$$d_{ij} x_{ij} - dp_{ij} \leq R \quad \forall i, j \in N, \quad (2f)$$

$$x_{i,j} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N, \quad (2g)$$

$$y_i \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in N, \quad (2h)$$

$$dp_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in N \quad (2i)$$

em que  $\alpha = \max_{i,j \in N} d_{ij}$  é a penalidade por violar a restrição de distância, dada pela Eq. (1f).

A função objetivo (2a) contém duas parcelas. A primeira é a mesma da formulação 1 e minimiza o somatório das distâncias entre o local em que um mamógrafo é instalado e a localidade atendida por ele, enquanto a segunda parcela penaliza o somatório dos desvios positivos de distância entre o local de instalação de um mamógrafo e os locais de atendimento. As restrições (2b) indicam que cada mulher só pode ser associada a um local onde esteja instalado um mamógrafo. As restrições (2c) impedem que uma mulher seja alocada a uma localidade que não contenha um mamógrafo. As restrições (2d) obrigam a alocação de  $p$  mamógrafos entre o conjunto de localidades. As restrições (2e) impedem que a capacidade de exames de um mamógrafo seja extrapolada. As restrições (2f) impõem o limite máximo de distância que a mulher pode percorrer para realizar seu exame. Finalmente, as restrições (2g) a (2i) definem o domínio das variáveis de decisão.

## 4.3. Formulações 3 e 4

Também foram desenvolvidas duas outras formulações, que diferem das formulações 1 e 2 por considerarem a demanda a ser atendida na função custo. Isto é, o custo a ser minimizado é o “volume” a ser atendido, dado pelo produto entre a distância a ser percorrida até o local de instalação

do mamógrafo e a demanda de mulheres que se deslocam. Assim, a formulação 3 consiste em considerar como função objetivo a Equação (3), em lugar da Equação (1a):

$$f(x) = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} q_j d_{ij} x_{ij} \quad (3)$$

Por outro lado, a formulação 4 contém as mesmas equações da formulação 2, devendo-se, apenas, substituir a Equação (2a) pela Equação (4):

$$f(x, dp) = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} q_j d_{ij} x_{ij} + \beta \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} dp_{ij} \quad (4)$$

em que  $\beta = \max_{j \in N} q_j \times \max_{i, j \in N} d_{ij}$  é a penalidade por violar a restrição de distância, dada pela Eq. (1f).

#### 4.4. Número mínimo de mamógrafos

Para determinar o número mínimo  $p_{\min}$  de mamógrafos para uma dada instância, basta substituir a função objetivo dada pela Eq. (1a) da formulação 1 da Subseção 4.1 pela Eq. (5), a seguir. Além disso, é necessário eliminar a Eq. (1d) da formulação 1.

$$\text{minimize } \sum_{i \in N} y_i \quad (5)$$

$$\text{Assim, } p_{\min} = \min \sum_{i \in N} y_i.$$

### 5. Resultados computacionais

Os modelos de programação linear inteira apresentados na Seção 4 foram implementados no *solver* GUROBI ([www.gurobi.com](http://www.gurobi.com)), versão 7.5, e testados em um computador equipado com um processador Intel(R) Core(TM) i7-4770 e 16 gigabytes de memória RAM.

#### 5.1. Instâncias

Para testar os modelos foram utilizadas instâncias disponibilizadas na OR-Library [Beasley, 1990], assim como instâncias criadas com base em dados reais disponíveis nos sistemas de recuperação de informação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE [SIDRA, 2017] e do Departamento de Informática do SUS – DATASUS [SUS, 2017], assim como no Google Maps utilizando a *Matrix Distance API*.

As instâncias reais foram criadas a partir de 12 regiões de saúde do Estado de Minas Gerais, a saber: Barbacena, Betim, Conselheiro Lafaiete, Contagem, Itabira, Itaúna, João Monlevade, Ouro Preto, Ponte Nova, São João Del Rei, Ubá e Viçosa. Essas regiões estão situadas em um raio de aproximadamente 100km da cidade de Ouro Preto. Cada uma dessas regiões de saúde envolve um conjunto de cidades. Por exemplo, a região de Ouro Preto (código 31047) envolve a própria cidade, além de Itabirito e Mariana. A relação de cidades em cada região de saúde está disponível no endereço <ftp://ftp.datasus.gov.br/territorio/mapas>.

O número de mamógrafos de cada região de saúde foi contabilizado, de forma que as instâncias foram formadas pelo somatório dos mamógrafos atualmente existentes. Foram geradas 7 instâncias reais, nomeadas m1 a m7, separadas em dois grupos. As instâncias m4 a m7 constituem o grupo maior e envolvem todas as 142 cidades dessas 12 regiões de saúde. Já as instâncias m1 a m3 são de um grupo menor e envolvem apenas 4 regiões de saúde, a saber: Ouro Preto, Conselheiro Lafaiete, Ponte Nova e Viçosa, totalizando 51 cidades. O que difere entre si as instâncias de um mesmo grupo são as quantidades de exames e mamógrafos. Por exemplo, na instância m4 a quantidade de mamógrafos disponível é 55 unidades (que é o total de mamógrafos das 12 regiões de saúde), enquanto na instância m5 é 44, que é suficiente para atender toda a demanda de todas as cidades sem levar em consideração as restrições de distância máxima. Se levarmos em consideração a formulação dada na Seção 4.4, o número de mamógrafos necessários nesta instância real seria de

no máximo 46 unidades (visto que o resolvidor GUROBI apresentou essa solução com um *gap* de 2.29% em duas horas de processamento). Também foram considerados dois cenários, um em que a produção anual de um aparelho de mamografia é de 5.069 exames [INCA, 2015b] e outro com esse valor de produção de 6.758 mamografias/ano, conforme preconizado em INCA [2012] e válido até 2015. Apenas um desses cenários é usado por instância.

Para cada instância de teste foi estipulado um tempo limite de 7200 segundos de execução. Os experimentos que alcançaram esse tempo limite foram encerrados automaticamente pelo *solver* e a melhor resposta obtida até esse tempo limite foi coletada.

A Tabela 1 mostra os resultados alcançados pelas formulações 1 e 2 quando utilizadas as instâncias da OR Library, enquanto a Tabela 2 mostra os resultados dessas formulações nas instâncias reais.

Na Tabela 1, a primeira coluna indica a instância considerada. Na coluna '*p*' é apresentado o número de mamógrafos a serem alocados, na coluna '*n*' é mostrado o número de localidades, na coluna '*R*', o valor da distância máxima considerada e na coluna '*α*' o valor da penalidade calculada como sendo a maior distância entre qualquer par de localidades (Vide Seção 4.2). Nas colunas '*Dist.*' são mostrados os valores da função objetivo, sem a parcela das penalidades, quando houver. No caso das formulações 1 e 2, essa coluna mostra o somatório das distâncias, em km, conforme as Equações (1a) e (2a), respectivamente. O número que aparece entre parênteses representa a distância máxima, em km, entre um local e seu respectivo ponto de atendimento. Nas colunas '*Gap*' são mostrados os valores de *gap* da formulação inteira apresentados pelo GUROBI. Nas colunas '*Tempo*' (ou '*T*') são apresentados os tempos computacionais, em segundos, demandados por cada formulação, limitado ao tempo limite estabelecido. A coluna '*Exc.*', por sua vez, mostra o somatório das violações de distância que compõem a segunda parcela da função objetivo dada pela Equação (2a), e entre parênteses é apresentada, para cada instância, a violação máxima ocorrida, em km, da distância máxima permitida.

A Tabela 2 contém as mesmas informações da Tabela 1, à exceção da coluna '*cap*', que contém a capacidade de produção do mamógrafo. A ocorrência da informação '*inv.*' em uma célula indica que não há solução viável na respectiva instância.

A Tabela 3 contém as mesmas informações das tabelas anteriores, e inclui colunas '*FO*', as quais computam o valor da função objetivo nas formulações 3 e 4, dadas pelas Equações (3) e (4), respectivamente.

Pela Tabela 1, observa-se que em 6 instâncias (p2, p6, p10, p12, p14 e p18), a formulação 1 não conseguiu gerar uma solução viável, visto o não atendimento da restrição de distância máxima. Por outro lado, a formulação 2 apresentou resultados nessas instâncias, sendo que na coluna '*Exc.*' é apresentado, para cada instância, o somatório dos valores excedentes à distância máxima permitida. Por exemplo, na instância p12 a melhor solução existente é aquela na qual há um excesso de 3 unidades de distância em relação à distância máxima permitida; entretanto, a violação máxima foi de apenas uma unidade de distância. Os tempos computacionais nessas duas formulações foram, em geral, bem próximos.

Na Tabela 2, por sua vez, pode-se verificar que a formulação 2 foi capaz de gerar soluções para as instâncias m5 e m7 que eram inviáveis com relação ao atendimento da restrição de distância máxima. Nas soluções obtidas, a soma dos excessos de violação da distância máxima foram de 633 e 650 km nas instâncias m5 e m7, respectivamente. Além disso, a violação máxima em cada uma dessas instâncias foi de 142 e 140 km, respectivamente.

A Tabela 3 serve para mostrar que quando se leva em consideração a quantidade de mulheres se deslocando para serem atendidas, há mudança nos resultados quando é feita a comparação com os resultados das formulações 1 e 3. Para ilustrar esse fato, são mostradas nas Figuras 2a e 2b a localização dos mamógrafos e os locais de atendimento na instância m1 ao se aplicar as formulações 1 e 3, respectivamente. Nessas figuras, cada localidade é representada por um círculo. Um círculo na cor preta indica que na localidade está instalado um mamógrafo, enquanto que na

Tabela 1: Resultados das formulações nas instâncias da OR-Library

Inst.	$p$	$n$	$R$	Formulação 1			Formulação 2			
				Dist.	Gap (%)	Tempo (s)	Dist.	Exc.	Gap (%)	Tempo (s)
p1	5	50	60	713 (50)	0,0	0,4	713 (50)	0	0,0	0,2
p2	5	50	32	Inv.	–	0,5	881 (33)	1 (1)	0,0	0,3
p3	5	50	60	751 (32)	0,0	0,1	751 (32)	0	0,0	0,2
p4	5	50	60	651 (42)	0,0	0,1	651 (42)	0	0,0	0,1
p5	5	50	60	664 (39)	0,0	2,9	664 (39)	0	0,0	1,7
p6	5	50	30	Inv.	–	1,6	944 (31)	1 (1)	0,0	0,8
p7	5	50	60	787 (42)	0,0	0,8	787 (42)	0	0,0	0,8
p8	5	50	60	820 (35)	0,0	1,9	820 (35)	0	0,0	3,1
p9	5	50	60	715 (39)	0,0	0,5	715 (39)	0	0,0	0,5
p10	5	50	31	Inv.	–	0,5	1074 (32)	1 (1)	0,0	0,4
p11	10	100	60	1006 (23)	0,0	3,7	1006 (23)	0	0,0	4,1
p12	10	100	19	Inv.	–	0,5	1461 (20)	3 (1)	0,0	4,0
p13	10	100	60	1026 (26)	0,0	0,7	1026 (26)	0	0,0	1,1
p14	10	100	19	Inv.	–	0,2	1202 (20)	1 (1)	0,0	0,8
p15	10	100	60	1091 (32)	0,0	4,6	1091 (32)	0	0,0	5,1
p16	10	100	60	954 (29)	0,0	2,3	954 (29)	0	0,0	2,7
p17	10	100	60	1034 (31)	0,0	4,6	1034 (31)	0	0,0	4,5
p18	10	100	20	Inv.	–	1,0	1211 (21)	1 (1)	0,0	6,5
p19	10	100	60	1031 (26)	0,0	7,7	1031 (26)	0	0,0	6,0
p20	10	100	60	1005 (29)	0,0	126,3	1005 (29)	0	0,0	161,1

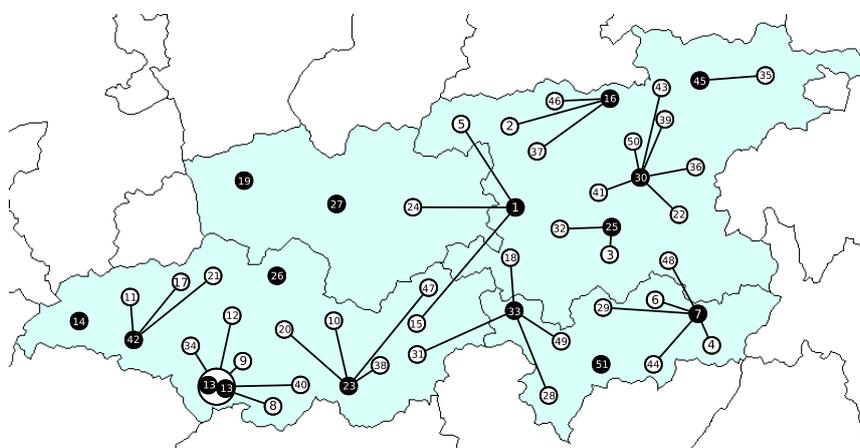
Tabela 2: Resultados das formulações 1 e 2 nas instâncias reais

Inst.	$p$	$n$	$cap$	Formulação 1			Formulação 2			
				Dist.	Gap (%)	Tempo (s)	Dist.	Exc.	Gap (%)	Tempo (s)
m1	16	51	5069	861 (54)	0,0	0,50	861 (54)	0	0,0	3,2
m2	16	51	6758	783 (42)	0,0	0,16	783 (42)	0	0,0	0,3
m3	12	51	6758	1013 (50)	0,0	0,24	1013 (50)	0	0,0	6,3
m4	55	142	5069	2544 (60)	0,0	6,74	2544 (60)	0	0,0	4,9
m5	44	142	5069	inv.	–	0,14	5625 (202)	633 (142)	90,9	7200,0
m6	55	142	6758	2157 (44)	0,0	2,26	2157 (44)	0	0,0	2,6
m7	33	142	6758	inv.	–	0,65	6133 (200)	650 (140)	81,6	7200,0

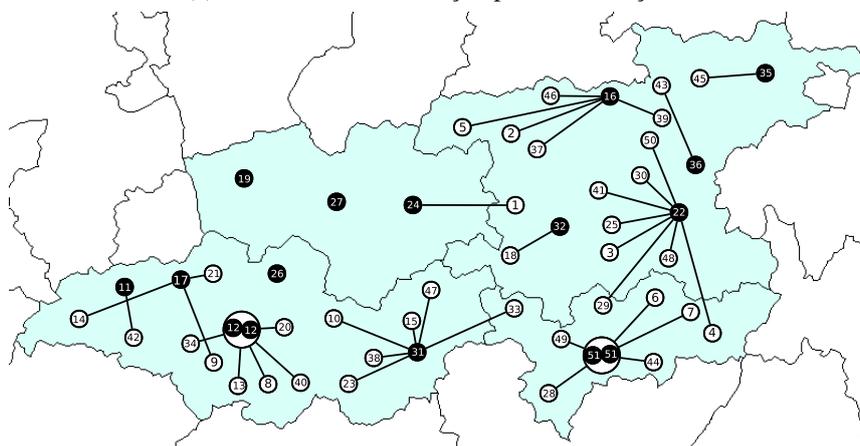
Tabela 3: Resultados das formulações 3 e 4 nas instâncias reais

Inst.	$p$	$n$	$cap$	Formulação 3				Formulação 4				
				FO	Dist.	Gap (%)	T (s)	FO	Dist.	Exc.	Gap (%)	T (s)
m1	16	51	5069	407034	1075 (51)	0,0	0,1	407034	1075 (51)	0	0,0	0,2
m2	16	51	6758	370076	1010 (51)	0,0	0,1	370076	1010 (51)	0	0,0	0,1
m3	12	51	6758	616741	1209 (60)	0,0	0,1	616741	1209 (60)	0	0,0	0,2
m4	55	142	5069	1466007	2936 (60)	0,0	0,2	1466007	2936 (60)	0	0,0	2,8
m5	44	142	5069	inv.	–	–	0,2	8017837899	5703 (213)	420 (153)	87,2	7200,0
m6	55	142	6758	1134185	2575 (57)	0,0	0,3	1072990	2575 (57)	0	0,0	1,3
m7	33	142	6758	inv.	–	–	0,2	4316714463	5245 (112)	226 (52)	48,7	7200,0

cor branca indica que essa localidade está atendida por outra, indicada por uma aresta. O número de círculos pretos em um mesmo local indica a quantidade de mamógrafos instalados naquele local. Um círculo na cor preta e isolado indica que na localidade que ela representa foi instalado um mamógrafo e esse equipamento atende apenas essa própria localidade. Ao se comparar as soluções apresentadas em cada uma dessas figuras, observa-se que algumas cidades deixaram de sediar a localização de mamógrafos, em função do número de mulheres que necessitariam se deslocar. Por exemplo, na Figura 2a a cidade Cristiano Ottoni (representada pela localidade 13) é a sede indicada para a instalação de dois mamógrafos pela formulação 1, sendo a cidade Conselheiro Lafaiete (representada pela localidade 12), uma das cidades à ela ligada. Por outro lado, na Figura 2b, a cidade Conselheiro Lafaiete é a sede indicada, pela formulação 3, para a localização de dois mamógrafos em lugar de Cristiano Ottoni. As duas cidades permanecem, assim, conectadas, mas com funções distintas. Dessas observações depreende-se que o volume de mulheres se deslocando tem influência na determinação dos locais de instalação dos mamógrafos.



(a) Resultado da localização pela Formulação 1



(b) Resultado da localização pela Formulação 3

Figura 2: Resultados das alocações na instância m1 pelas formulações 1 e 3

## 6. Conclusões

Este trabalho teve seu foco no Problema de Alocação de Mamógrafos (PAM). Para resolvê-lo foram desenvolvidas quatro formulações, sendo que a primeira o trata como o problema das  $p$ -medianas acrescido de uma restrição que impõe uma distância máxima de deslocamento entre os locais onde serão instalados os mamógrafos e os locais a serem atendidos por esses mamógrafos. Na segunda formulação, a restrição de distância máxima é relaxada, sendo a distância excedente

minimizada na função objetivo. Com essa segunda formulação permite-se encontrar soluções que minimizem a distância total entre todos os locais atendidos até os seus respectivos locais onde estão instalados os mamógrafos e que minimizem, também, a soma das distâncias excedentes à máxima permitida. Na terceira e quarta formulações levam-se em consideração o volume de mulheres se deslocando, sendo que na quarta formulação permite-se relaxar a restrição de deslocamento máximo.

Para validar as formulações foram usadas instâncias clássicas da literatura, acrescidas da restrição de distância máxima, com diversos valores para essa distância, assim como instâncias reais envolvendo cidades da região dos inconfidentes e próximas a ela.

Os resultados mostraram que com o relaxamento das restrições de distância máxima é possível encontrar alternativas para situações em que não haveria solução se a restrição de distância máxima fosse respeitada. Por outro lado, quando se leva em consideração o volume de mulheres se deslocando, há mudança na localização dos mamógrafos. Essa formulação, a quarta, pode ser usada se o interesse for minimizar os custos com o deslocamento das mulheres.

Os resultados obtidos neste trabalho são interessantes para serem analisados pelos gestores públicos da área de saúde quando forem decidir a melhor alocação dos equipamentos existentes. De fato, pelos resultados encontrados, observou-se que há mamógrafos suficientes para atender a toda a demanda feminina, inclusive respeitando-se todas as restrições impostas. No entanto, a distribuição atual é inadequada, visto que há cidades nas regiões analisadas em que as mulheres têm que se deslocar para serem atendidas em outras cidades, dado que a quantidade de mamógrafos alocados na cidade em que elas residem não é suficiente para atender à demanda.

Trabalhos futuros serão feitos na direção de considerar outras formulações, como por exemplo, a de minimizar a distância máxima entre os locais de residência das mulheres e os locais em que devem ser instalados os mamógrafos. Também pretende estender o trabalho para todo o Estado de Minas Gerais, que conta com 853 municípios.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao CNPq, à FAPEMIG e à UFOP pelo apoio ao desenvolvimento da presente pesquisa.

### **Referências**

- Amaral, P., Luz, L., Cardoso, F., e Freitas, R. (2017). Distribuição espacial de equipamentos de mamografia no Brasil. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, 19(2):326–341.
- Andrade, M. V., de Souza Noronha, K. M., do Amaral, P. V. M., Barbosa, A. C. Q., de Carvalho, L. R., Calazans, J. A., Souza, M. N., de Souza, A., Rocha, T. A. H., e da Silva, N. C. (2016). Distribuição espacial dos mamógrafos em Minas Gerais e o efeito na probabilidade da realização do exame. In *Anais do XX Encontro Nacional de Estudos Populacionais*, p. 1–21. Associação Brasileira de Estudos Populacionais (ABEP). Disponível em <http://www.abep.org.br/publicacoes/index.php/anais/article/view/2506/2450>. Acesso em 18/10/2017.
- Beasley, J. E. (1990). Or-library. Disponível em <http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/info.html>. Acesso em 17/10/2017.
- Brasil (2015). Critérios e parâmetros para o planejamento e programação de ações e serviços de saúde no âmbito do sistema Único de saúde. Ministério da Saúde, Secretaria de Atenção à Saúde, Departamento de Regulação, Avaliação e Controle de Sistema. Disponível em <http://www.fehosp.com.br/app/webroot/files/manuais/5ffa8d1e03f7edb01e1eed7b07178cfb.pdf>. Acesso em 01/12/2017.
- de Melo Sathler, T., Conceição, S. V., Almeida, J. F., Pinto, L. R., de Campos, F. C. C., e Miranda Júnior, G. (2017). Problema de localização e alocação de centros de especialidades

- médicas no estado de minas gerais. In *Anais do XLIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional – XLIX SBPO*, Blumenau. Disponível em <http://www.sbpo2017.iltc.br/pdf/168959.pdf>. Acesso em 16/01/2018.
- INCA (2009). Parâmetros para o rastreamento do câncer de mama: recomendações para gestores estaduais e municipais. Instituto Nacional do Câncer. Disponível em [http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/parametros\\_rastreamento\\_cancer\\_mama.pdf](http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/parametros_rastreamento_cancer_mama.pdf). Acesso em 01/12/2017.
- INCA (2012). Parâmetro para cálculo da capacidade de produção do mamógrafo simples - 2012. Instituto Nacional do Câncer. Disponível em <http://www2.inca.gov.br/wps/wcm/connect/a79eb3804eb684918aa79af11fae00ee/Par%C3%A2metro+de+produ%C3%A7%C3%A3o+do+mam%C3%B3grafo+simples.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=a79eb3804eb684918aa79af11fae00ee>. Acesso em 23/11/2017.
- INCA (2015a). Inca estima que haverá 596.070 novos casos de câncer em 2016. Instituto Nacional do Câncer. Disponível em [http://www2.inca.gov.br/wps/wcm/connect/agencianoticias/site/home/noticias/2015/estimativa\\_incidencia\\_cancer\\_2016](http://www2.inca.gov.br/wps/wcm/connect/agencianoticias/site/home/noticias/2015/estimativa_incidencia_cancer_2016). Acesso em 30/01/2018.
- INCA (2015b). Revisão do parâmetro para cálculo da capacidade de produção do mamógrafo simples - 2015. Instituto Nacional do Câncer. Disponível em <http://www2.inca.gov.br/wps/wcm/connect/fb4249004a99e827be5dfe504e7bf539/Nota+Revis%C3%A3o+Capacidade+dos+Mam%C3%B3grafos+2015.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=fb4249004a99e827be5dfe504e7bf539>. Acesso em 18/10/2017.
- Jardim, R. X. e Conceição, S. V. (2004). Localização de unidades de resgate em belo horizonte. In *Anais do XXXVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional – XXXVI SBPO*, p. 1771–1780, São João Del Rei.
- SIDRA (2017). Banco de tabelas estatísticas. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em <https://sidra.ibge.gov.br/home/pms/brasil>. Acesso em 18/10/2017.
- Soares, G. F. (2009). Algoritmos primais e duais para o problema das p-medianas. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Informática, PUC-Rio, Rio de Janeiro.
- SUS (2017). Tabnet. Departamento de Informática do SUS. Disponível em <http://www2.datasus.gov.br/DATASUS/index.php?area=02>. Acesso em 18/10/2017.
- Xavier, D. R., de Oliveira, R. A. D., de Matos, V. P., Viacava, F., e de Campos Carvalho, C. (2016). Cobertura de mamografias, alocação e uso de equipamentos nas regiões de saúde. *Saúde em debate*, 40(110):20–35.