

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
ESCOLA DE ENGENHARIA

# Um Modelo Matemático de Localização de Facilidades e Alocação de Equipamentos na Saúde Pública

**Tamara de Melo Sathler**

**Orientador:** Prof. Dr. Samuel Vieira Conceição  
**Coorientador:** Prof. Dr. João Flávio de Freitas Almeida

Belo Horizonte  
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
ESCOLA DE ENGENHARIA

# Um Modelo Matemático de Localização de Facilidades e Alocação de Equipamentos na Saúde Pública

Tamara de Melo Sathler

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

**Área de Concentração:** Pesquisa Operacional e Engenharia de Manufatura

**Linha de Pesquisa:** Otimização de Sistemas Logísticos e de Grande Porte

**Orientador:** Prof. Dr. Samuel Vieira Conceição

**Coorientador:** Prof. Dr. João Flávio de Freitas Almeida

Belo Horizonte  
2018

S253m Sathler, Tamara de Melo.  
Um modelo matemático de localização de facilidades e alocação de equipamentos na saúde pública [manuscrito] / Tamara de Melo Sathler. - 2018.

vii, 63 f., enc.: il.

Orientador: Samuel Vieira Conceição.

Coorientador: João Flávio de Freitas Almeida.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 57-63.

Bibliografia: f. 52-56.

1. Engenharia de produção - Teses. 2. Saúde pública - Teses.  
3. Modelos matemáticos - Teses. 4. Programação (Matemática) - Teses.  
I. Conceição, Samuel Vieira. II. Almeida, João Flávio de Freitas  
III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.  
IV. Título

CDU: 658.5(043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**UFMG**

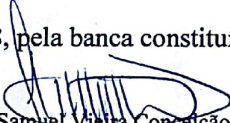
## FOLHA DE APROVAÇÃO

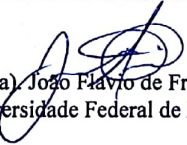
### **Um Modelo Matemático de Localização de Facilidades e Alocação de Equipamentos na Saúde Pública**

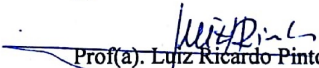
#### **TAMARA DE MELO SATHLER**


Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, área de concentração PESQUISA OPERACIONAL E ENGENHARIA DE MANUFATURA, linha de pesquisa Otimização e Simulação de Sistemas Logísticos e de Grande Porte.

Aprovada em 23 de março de 2018, pela banca constituída pelos membros:

  
Prof(a). Samuel Vieira Conceição - Orientador  
Universidade Federal de Minas Gerais

  
Prof(a). João Flávio de Freitas Almeida  
Universidade Federal de Minas Gerais

  
Prof(a). Luiz Ricardo Pinto  
Universidade Federal de Minas Gerais

  
Prof(a). Lásara Fabricia Rodrigues  
Universidade Federal de Ouro Preto

Belo Horizonte, 23 de março de 2018.

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus por ter me dado força e saúde para superar todos os desafios e por colocar pessoas tão especiais durante essa caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Samuel Vieira Conceição pela confiança e oportunidade de trabalharmos juntos em um projeto de grande impacto e importância social, pelo conhecimento e experiência compartilhada, pela valiosa orientação e pela amizade.

Ao meu coorientador, Prof. João Flávio de Freitas Almeida, por cada ensinamento compartilhado, pelas valiosas correções e sugestões de melhorias, pela disponibilidade, empenho, paciência e enorme incentivo durante a realização deste trabalho e pela amizade.

À minha família, especialmente meus pais, Dilcinéia e Luiz Carlos, e meus irmãos, Lorena e João Luiz, pelo amor e carinho e por todo apoio fundamental na minha formação como pessoa e profissional.

Ao meu marido, Luidy, pelo amor, companheirismo, compreensão e incentivo diante a distância e todos os momentos mais difíceis.

À todos meus amigos pelo convívio diário apoiando em momentos de dificuldade, compartilhando conhecimento, pelas conversas e desabafos tornando a caminhada mais leve e prazerosa.

Por fim, agradeço à CAPES pelo apoio financeiro para desenvolvimento desta pesquisa.

# Resumo

Este trabalho propõe um estudo do problema de localização de Centros de Especialidades Médicas (CEMs) e a alocação de equipamentos médicos. A abordagem integrada desse problema representa uma oportunidade de pesquisa no setor da saúde, visto que estes problemas são tradicionalmente tratados de forma separada. Um dos desafios deste estudo consiste em determinar os locais onde serão realizados os atendimentos médicos baseados na demanda populacional. Além disso, a aquisição de novos equipamentos também deve ser feita de forma simultânea baseada na demanda por exames médicos. Adota-se a programação matemática para integrar decisões de localização de CEMs e a alocação de equipamentos médicos de forma a otimizar o atendimento da população. Elaborou-se três formulações: uma de localização de CEMs; uma para alocação de equipamentos; e uma formulação integrada contemplando a localização de CEMs e a alocação de equipamentos simultaneamente. A formulação integrada obteve melhores resultados em relação as abordagens não integradas em instâncias testes. O resultado é ilustrado por meio de exemplo numérico. O problema foi aplicado para o estado de Minas Gerais e contribui com o planejamento de operações logísticas no setor de saúde pública para melhoria na igualdade de acesso. De forma geral, o governo precisa contratar aproximadamente 4% a mais de médicos em relação ao disponível para atender 99% da população e 1.5% de equipamentos para atender parcela da população. O método é amplo sendo aplicável a problemas de localização e alocação de recursos em outros setores que visam a maximização do atendimento da demanda e utilização eficaz dos recursos.

**Palavras chave:** Localização de Facilidades, Programação Matemática, Equidade Social, Saúde Pública, Modelo Integrado.

# Abstract

This work aims at proposing a study in location problem of Medical Specialties Centers (MSCs) and medical equipment allocation. Addressing these problems in an integrated manner is an opportunity of study in the health sector, as they are traditionally treated separately. Challenges include the location of medical care based on population demand, the acquisition of new equipment, which is made simultaneously, based on the demand for medical examinations. We propose a mathematical programming approach to integrate decisions of MSCs location and medical equipment allocation in order to satisfy population demand. Three formulations were developed: one for MSCs locations; one for equipment allocation; and an integrated formulation with the MSCs location and equipment allocation simultaneously. The integrated model achieve better results compared to the non-integrated approach in test instances. The method is illustrated in a numerical example. The problem was applied to healthcare planning on secondary level for the state of Minas Gerais and contributes to the logistics operations planning in the public health sector, minimizing the inequalities of access. In general, the government needs to hire approximately 4% more physicians beyond available to cover 99% of population and 1.5% more equipment to assist part of the population. The method is generic and applicable to location and resources allocation problems in sectors that aim to maximize the satisfaction and efficient use of resources.

**Keywords:** Facility location, Social Equity, Public Health, Mathematical Programming, Integrated Model.

# Lista de Figuras

1.1	Municípios com mamógrafos em MG. . . . .	2
3.1	Ilustração exemplo numérico. . . . .	22
3.2	Resultado da função objetivo dos modelos não-integrado (NI) e integrado (I). . . . .	27
3.3	Demanda atendida por especialidade médica do modelo não-integrado (NI) e integrado (I). . . . .	27
3.4	Horas adicionais de especialista do modelo não-integrado (NI) e integrado (I). . . . .	28
3.5	Demanda atendida de exames do modelo não-integrado (NI) e integrado (I). . . . .	28
3.6	Horas adicionais de exames do modelo não-integrado (NI) e integrado (I). . . . .	28
4.1	Municípios com <i>IVS</i> maior que 0.301, em cinza e maior que 0.501, em vermelho. . . . .	33
4.2	Resultados separados para atendimento e horas adicionais de médicos e exames. . . . .	34
4.3	Municípios selecionados para receberem atendimento. . . . .	35
4.4	Horas disponíveis de especialistas por região de saúde e por equipamento: [1]: Angiologia, [2]: Cardiologia, [3]: Endocrinologia, [4]: Ginecologia, [5]: Mastologia, [6]: Nefrologia, [7]: Oftalmologia, [8]: Pediatria, [9]: Urologia. . . . .	37
4.5	Deslocamento de pacientes para atendimento médico em MG com destaque para as regiões nordeste, central e triângulo mineiro. . . . .	38
4.6	Análises dos resultados de especialidades médicas: [1]: Angiologia, [2]: Cardiologia, [3]: Endocrinologia, [4]: Ginecologia, [5]: Mastologia, [6]: Nefrologia, [7]: Oftalmologia, [8]: Pediatria, [9]: Urologia. . . . .	39
4.7	Horas adicionais necessárias para contratação de pediatras por região de saúde, quanto mais intensa a cor azul maior a necessidade de médicos. . . . .	39
4.8	Horas disponíveis de exames por município e equipamento: [1]: Mamógrafo, [2]: Ressonância Magnética, [3]: Tomógrafo, [4]: Ultrassom Convencional, [5]: Ultrassom Doppler. . . . .	42
4.9	Deslocamento de pacientes para atendimento em exame em MG. . . . .	43
4.10	Análises dos resultados para exames médicos: [1]: Mamógrafo, [2]: Ressonância Magnética, [3]: Tomógrafo, [4]: Ultrassom Convencional, [5]: Ultrassom Doppler. . . . .	44
4.11	Municípios escolhidos para instalação dos CEMs, em cinza os municípios semelhantes e em vermelho os municípios diferentes nas duas decisões. . . . .	47



# Lista de Tabelas

1.1	Distribuição dos hospitais por faixa populacional em MG. . . . .	2
2.1	Trabalhos com abordagem integrada de localização de facilidades. . . . .	10
3.1	Relação especialidade e equipamento: [1]: Mamógrafo, [2]: Ressonância Magnética, [3]: Tomógrafo, [4]: ultrassom Convencional, [5]: Ultrassom Doppler. . . . .	15
3.2	Conjuntos das formulações propostas . . . . .	16
3.3	Parâmetros das formulações propostas . . . . .	16
3.4	Variáveis das formulações propostas . . . . .	16
3.5	Elementos exemplo numérico. . . . .	22
3.6	Demandas por médicos e exames por município. . . . .	23
3.7	Município por região de saúde. . . . .	23
3.8	Disponibilidade especialista. . . . .	23
3.9	Disponibilidade exames. . . . .	23
3.10	População por município. . . . .	24
3.11	Equipamentos utilizados pelas especialidade médicas. . . . .	24
3.12	Resultado função objetivo modelo não-integrado x integrado. . . . .	24
3.13	Atendimento da demanda por especialidade médica - MLCEM . . . . .	25
3.14	Atendimento da demanda por especialidade médica - MLACE . . . . .	25
3.15	Atendimento da demanda por exames - MLACE . . . . .	25
3.16	Número de CEMs e distância máxima. . . . .	25
3.17	Número de equipamentos disponíveis para compra. . . . .	25
3.18	Disponibilidade de exames. . . . .	26
3.19	Disponibilidade de especialistas. . . . .	26
3.20	Identificação dos testes. . . . .	26
4.1	Planejamento do experimento. . . . .	31
4.2	Identificação configuração de $NE_q$ . . . . .	31
4.3	Resultados dos experimentos: FO: Função Objetivo, A: Horas de atendimento médico, HAM: Horas adicionais de médico, E: Horas de atendimento de exames, HAE: Horas adicionais de exame. . . . .	32
4.4	Resultado função objetivo. . . . .	35
4.5	Municípios selecionados para receberem uma instalação de CEM. . . . .	36
4.6	Atendimento médico em horas/semana por CEM. . . . .	36
4.7	Atendimento Médico em horas/semana por especialidade em Belo Horizonte: [1]: Angiologia, [2]: Cardiologia, [3]: Endocrinologia, [4]: Ginecologia, [5]: Mastologia, [6]: Nefrologia, [7]: Oftalmologia, [8]: Pediatria, [9]: Urologia, [T]:Total. . . . .	37

4.8	Representatividade das demandas de especialidade médica por faixas de atendimento. . . . .	37
4.9	Horas adicionais necessárias para contratação em especialidade médica: [1]: Angiologia, [2]: Cardiologia, [3]: Endocrinologia, [4]: Ginecologia, [5]: Mastologia, [6]: Nefrologia, [7]: Oftalmologia, [8]: Pediatria, [9]: Urologia, [T]: Total. . . . .	40
4.10	Atendimento de exames em horas/semana por município. . . . .	41
4.11	Atendimento Exames por Equipamento em Belo Horizonte: [1]: Mamógrafo, [2]: Ressonância Magnética, [3]: Tomógrafo, [4]: Ultrassom Convencional, [5]: Ultrassom Doppler, [T]: Total. . . . .	42
4.12	Representatividade das demandas de exames por faixas de atendimento. . .	42
4.13	Horas adicionais necessárias para atendimento em exames: [1]: Mamógrafo, [2]: Ressonância Magnética, [4]: Ultrassom Convencional, [T] . . . . .	44
4.14	Resultado análise ponderação. . . . .	46
A.1	Atendimento em horas semanais da demanda por Médico em Belo Horizonte: [1]: Angiologia, [2]: Cardiologia, [3]: Endocrinologia, [4]: Ginecologia, [5]: Mastologia, [6]: Nefrologia, [7]: Oftalmologia, [8]: Pediatria, [9]: Urologia, [T]:Total . . . . .	57
A.2	Atendimento em horas semanais da demanda por exames em Belo Horizonte:[1]: Mamógrafo, [2]: Ressonância Magnética, [3]: Tomógrafo, [4]: Ultrassom Convencional, [5]: Ultrassom Doppler, [T]: Total . . . . .	59
B.1	Atendimento Médico por CEM: [1]: Angiologia, [2]: Cardiologia, [3]: Endocrinologia, [4]: Ginecologia, [5]: Mastologia, [6]: Nefrologia, [7]: Oftalmologia, [8]: Pediatria, [9]: Urologia, [T]:Total . . . . .	60
B.2	Atendimento da demanda por equipamento: [1]: Mamógrafo, [2]: Ressonância Magnética, [3]: Tomógrafo, [4]: Ultrassom Convencional, [5]: Ultrassom Doppler, [T]:Total . . . . .	61

# Lista de Abreviaturas

**AMPL:** A Mathematical Programming Language

**API:** Application Programming Interface

**CEM:** Centro de Especialidade Médica

**CIR:** Comissões Intergestores Regionais

**CNES:** Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde

**DATASUS:** Banco de Dados do SUS

**DEP:** Departamento Engenharia de Produção

**Gurobi:** *Solver* de programação Matemática

**IBGE:** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**IDH:** Índice de Desenvolvimento Humano

**IPEA:** Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

**IVS:** Índice de Vulnerabilidade Social

**MAEQU:** Modelo de Alocação de Equipamento

**MLACE:** Modelo Integrado de Localização e Alocação de CEM e Equipamento

**MLCEM:** Modelo de Localização de CEM

**NESCON:** Núcleo de Educação em Saúde Coletiva

**PLIM:** Programação Linear Inteira Mista

**PLMC:** Problema Localização Máxima Cobertura

**SES-MG:** Secretaria do Estado de Saúde de Minas Gerais

**SUS:** Sistema Único de Saúde

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>vii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo Geral . . . . .	4
1.1.1 Objetivos Específicos . . . . .	5
1.2 Estrutura da Dissertação . . . . .	5
<b>2 Revisão de Literatura</b>	<b>6</b>
2.1 Problemas de Localização de Facilidade . . . . .	6
2.2 Equidade nos Problemas de Localização . . . . .	8
2.2.1 Indicadores Socioeconômicos . . . . .	9
2.3 Modelos Integrados de Localização de Facilidades . . . . .	10
<b>3 Metodologia de Pesquisa</b>	<b>12</b>
3.1 Levantamento de Dados . . . . .	12
3.2 Considerações do Problema . . . . .	15
3.3 Modelagem Matemática . . . . .	15
3.3.1 Modelo de Localização - MLCEM . . . . .	16
3.3.2 Modelo de Alocação - MAEQU . . . . .	19
3.3.3 Modelo Integrado de Localização e Alocação - MLACE . . . . .	21
3.3.4 Exemplo Numérico . . . . .	22
<b>4 Resultados e Discussões</b>	<b>30</b>
4.1 Análise de Cenários . . . . .	30
4.2 Análise Atendimento Máximo . . . . .	34
4.3 Ponderação entre atendimentos Médicos e de Equipamentos . . . . .	45
<b>5 Conclusões</b>	<b>48</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>52</b>
<b>A Fluxo de Atendimento das Demandas em Belo Horizonte</b>	<b>57</b>
<b>B Atendimento das Demandas nos Municípios Escolhidos</b>	<b>60</b>

# Capítulo 1

## Introdução

Um dos grandes problemas enfrentados pela população brasileira é a dificuldade de acesso a unidades de saúde pública bem equipadas. Determinar a localização ideal de hospitais e dimensionar os recursos necessários é complexo dada as desigualdades sociais e de acesso a diferentes regiões geográficas. Para isso, ferramentas analíticas de apoio a decisão baseadas em modelos matemáticos são importantes no auxílio ao planejamento de operações no setor da saúde.

No Brasil, o Sistema Único de Saúde (SUS) é recente e visa proporcionar a igualdade de acesso a serviços públicos de saúde de qualidade a todos os cidadãos. Implementado pela Constituição de 1988, o SUS tem lidado com fortes transições epidemiológicas, através de mudanças nos padrões de saúde e doença da população relacionados as transformações sociais, econômicos e demográficos. O sistema é sustentado financeiramente por impostos e taxas de contribuição social. Um dos grandes desafios do governo é propor a igualdade de acesso, visto que a população é heterogênea quanto a renda e etnia e distribuída desigualmente no espaço geográfico. Municípios mais desenvolvidos concentram grande parte dos recursos e o governo é dependente do setor privado quando os atendimentos especializados precisam ser realizados em equipamentos de alto custo. Além disso, em municípios pouco desenvolvidos a qualidade do atendimento é afetada pela alta rotatividade de médicos decorrente das disparidades salariais entre municípios [47].

O SUS é organizado em três níveis hierárquicos: atenção primária, secundária e terciária [48]. A atenção primária é formada pelas Unidades Básicas de Saúde (UBS), nas quais os pacientes recebem atendimentos básicos de saúde e orientações de prevenção. Em casos de média complexidade, os pacientes são encaminhados aos níveis secundários e terciários representados por centros de especialidade médica e hospitais, respectivamente [2]. O estudo proposto aborda o nível secundário da rede pública de saúde de Minas Gerais (MG).

Minas gerais é o segundo estado mais populoso do Brasil, com 21.119.536 habitantes estimado em 2017 [5]. O estado possui 853 municípios, 1.633 distritos e 77 regiões de saúde [3]. É o estado com o maior número de municípios e o quarto em extensão territorial do Brasil. Dentre os 853 municípios, 26.1% (223) possuem até 5.000 habitantes, 86% (734), até 30.000 habitantes, e apenas 3.1% (27) possuem mais de 100.000 habitantes [5]. O estado possui claras diferenças de densidade demográfica e elevadas disparidades socioeconômicas entre as regiões. As regiões Central, Sul e Zona da Mata concentram a maioria dos municípios mais populosos em pequena extensão territorial. Enquanto as

regiões Norte, Noroeste, Jequitinhonha/Mucuri e Rio Doce são caracterizadas pela baixa densidade populacional em grande extensão territorial. Em termos socioeconômicos, as regiões Jequitinhonha/Mucuri e Rio Doce são as mais vulneráveis. Essas características refletem os problemas enfrentados pela população e desafiam os gestores no planejamento de operações da saúde.

A maior concentração de hospitais, equipamentos e recursos humanos especializados encontra-se no centro e no sul do estado, que são as regiões mais populosas e desenvolvidas, o que demonstra o acesso desigual à saúde com elevado deslocamento de pacientes para receber um atendimento. Apesar de 60% dos hospitais estarem localizados em municípios de até 20.000 habitantes, as instalações são de pequeno porte e de baixa resolutividade para os níveis de média e alta complexidade [41]. A Tabela 1.1 apresenta a quantidade de municípios e hospitais por faixa populacional em MG.

Tabela 1.1: Distribuição dos hospitais por faixa populacional em MG.

Faixa Populacional	Número de Municípios		
	Com Hospital	Sem Hospital	Total
0 até 5.000 hab	21	204	225
5.001 a 10.000 hab	75	189	264
10.001 a 20.000 hab	140	42	182
20.001 a 50.000 hab	108	9	117
50.001 a 100.000 hab	38	0	38
100.001 a 500.000 hab	23	0	23
500.001 ou mais hab	4	0	4
<b>TOTAL</b>	409	444	853

Fonte: adaptado PDR 2010 [41].

O nível secundário de saúde exige equipamentos de média e alta complexidade tecnológica. Dessa forma, assim como os hospitais especializados, esses serviços também estão concentrados nos grandes centros urbanos. Como exemplo, os mamógrafos disponíveis pelo SUS em MG concentram-se majoritariamente nas regiões central e sudoeste, como apresentado na Figura 1.1. Além disso, evidencia-se uma alta dependência do setor público em relação às redes privadas conveniadas. No caso dos mamógrafos, por exemplo, a capacidade existente do SUS cobre apenas 38% da demanda populacional. A demanda complementar por exames é paga pelo estado às redes privadas a preço de mercado [48].

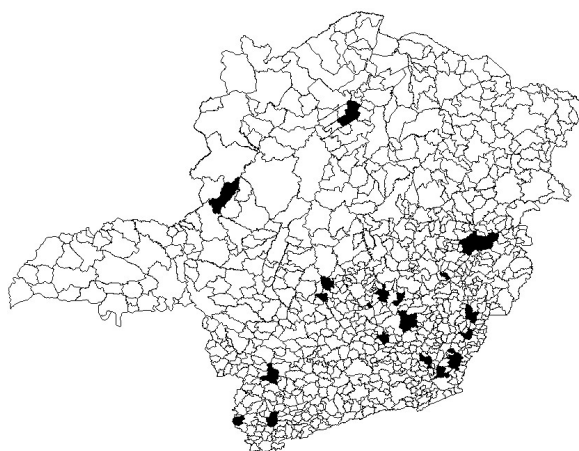


Figura 1.1: Municípios com mamógrafos em MG.

Fonte: DATASUS (2015) [3].

Atualmente, o atendimento no nível secundário é disperso, de baixa qualidade e rea-

lizado em pequenas unidades de saúde. Os custos para aquisição, manutenção de equipamentos e equipes especializadas em diversas pequenas unidades de saúde representam um problema de gestão pública. Por isso, a SES-MG propõe a regionalização dos serviços de saúde no nível secundário em microrregiões, de forma a reduzir o deslocamento de pacientes e aumentar a capacidade resolutiva de cada microrregião [41].

A localização de instalações é um problema de natureza estratégica para organizações públicas e privadas. O problema consiste em determinar o local de instalação de facilidades no espaço, de forma a atender a demanda de clientes geograficamente dispersos. A literatura apresenta estudos de revisão, abordando métodos exatos e heurísticos de resolução de problemas de localização [32] [46] [26].

Os problemas de localização podem ter objetivos diferentes e são discutidos em estudos clássicos. Os modelos de cobertura de conjuntos [62] visam determinar o número mínimo de instalações e suas localizações de forma a atender toda a demanda. Os modelos de máxima cobertura [23] maximizam o atendimento da demanda dado um número fixo de facilidades. O  $p$ -Centro [33] busca minimizar a máxima distância entre o ponto de demanda e a facilidade mais próxima. O modelo de  $p$ -Medianas [33] [34] tem como objetivo localizar um número pré determinado de facilidades de forma a minimizar a distância ponderada total entre o ponto de demanda e a facilidade.

Por sua grande aplicabilidade prática, os trabalhos de localização são amplamente estudados em contextos reais apresentando abordagens que tratam, entre outras, questões orçamentárias, sociais, físicas, de disponibilidade de recursos materiais e pessoal [18] [69] [12] [35]. O presente estudo aborda o problema de localização de máxima cobertura (PLMC) contemplando a questão da equidade para este tipo de problema na saúde. Estudos recentes sobre equidade em problemas de localização de facilidades de saúde são raros em países em desenvolvimento como o Brasil [19] [11]. A forma mais comum de medida de equidade e justiça nos serviços de saúde é através de modelos que minimizam a medida de desigualdade [45] [19] [9] [38].

Estudos recentes de revisão demonstram que a literatura apresenta um *gap* em propostas de desenvolvimento de modelos que integram a localização de centros de saúde e alocação de equipamentos destacando o fator de integração como um importante tópico de pesquisa [8]. Localizar as facilidades para em seguida equipá-las, como realizado na forma clássica, pode levar a resultados subótimos, pois assume-se mesma capacidade e habilidade para todas as facilidades, contradizendo a realidade [56]. Os modelos integrados de localização e alocação possuem a vantagem de abordar decisões, que até então eram desvinculadas, de forma simultânea podendo apontar soluções logísticas mais eficazes. Exemplos de integração incluem problemas de localização-roteamento [21], de localização-estocagem [58] e integração de serviços de saúde com o uso de helicópteros [8].

Esse estudo se propõe a preencher este *gap*. Elaborar-se um modelo que integra dois modelos propostos, um de localização de centros de saúde e outro de alocação de equipamentos. A proposta está alinhada à necessidade da SES-MG em conjunto com a equipe de projeto do DEP e NESCON, que visa apresentar uma metodologia integrada para determinar a localização de novos CEMs e alocação de equipamentos, conforme a Resolução SES/MG 5063, de 09 de dezembro de 2015 [50].

Cada CEM deverá ter produção em no mínimo três, das nove seguintes especialidades médicas: cardiologia, pediatria, mastologia, ginecologia, endocrinologia, oftalmologia, nefrologia, urologia e angiologia. Estas especialidades representam as principais demandas

por serviços de saúde no estado de acordo com o cenário demográfico, o perfil epidemiológico, o envelhecimento da população e o crescimento econômico. Os CEMs serão equipados com tomógrafo, mamógrafo, ressonância magnética, ultrassom doppler e ultrassom obstétrico. O modelo, no entanto, deve ser flexível e não se restringir aos números limitantes de especialidade médica ou equipamentos.

O modelo deve atender o máximo da demanda populacional, limitando o deslocamento do usuário a uma distância pré-definida. A meta estabelecida pelo governo de MG é de instalar um CEM a no máximo 80 km do paciente [1]. Porém foi verificado através de testes dos modelos matemáticos que essa distância é muito baixa considerando as premissas adotadas neste trabalho e as características demográficas do estado. A equipe do projeto propôs um raio de cobertura inicial de 200 km [50]. Essa distância permite o atendimento tanto de municípios de maior extensão territorial e baixa população, como municípios mais populosos. Além disso, essa pesquisa contempla os municípios mais vulneráveis socialmente através da inserção do critério de equidade pelo nível mínimo de atendimento dos municípios classificados como mais vulneráveis. Essa classificação ocorre pela análise de indicadores sociais.

O desafio no desenvolvimento do modelo integrado consiste em representar matematicamente as relações de interdependência entre as demandas por exames e por especialista. A demanda por exames do equipamento só é considerada atendida se houver o atendimento do médico especialista que utiliza o equipamento. Além disso, a compra de equipamentos só pode ser realizada para os municípios que recebem um CEM. O trabalho é desafiador principalmente pela sua área de aplicação. A prestação de serviço na saúde pública é afetada por fatores de flutuações da demanda, influenciada pela estilo de vida e expectativas do público, a demografia local, tecnologias, mão-de-obra, informação e comunicação [42]. Por isso, a relevância da inclusão da equidade social, buscando garantir nível de serviço mínimo para a população mais carente.

Este estudo apresenta quatro importantes contribuições à literatura de modelos integrados de localização e alocação de facilidades no setor da saúde. Primeiramente, o modelo contempla a divisão da demanda em grupos socioeconômicos, motivando o atendimento da mesma com nível mínimo de acesso. Para isso, realiza-se análises de indicadores que incorporem fatores educacionais, de acesso a transporte público, de renda, saúde, para classificação dos municípios. Segundo, o estudo considera padrões de infraestrutura, que são características essenciais na instalação dos CEMs. Terceiro, o estudo propõe a integração de modelos de localização e de alocação em um único modelo integrado maximizando o atendimento da demanda por médicos e equipamentos simultaneamente para o melhor aproveitamento dos recursos existentes. Finalmente, a quarta contribuição se relaciona ao incentivo da prática de planejamento dos recursos de saúde através de modelos matemáticos que busquem a minimização das desigualdades sociais e de acesso, a distribuição mais justa dos serviços de saúde e a utilização mais eficaz dos recursos públicos em países em desenvolvimento.

## 1.1 Objetivo Geral

O propósito desta dissertação é desenvolver uma nova formulação matemática que aborde o problema de localização de facilidades e de alocação de equipamentos de forma



integrada. Os modelos matemáticos baseiam-se no Problema clássico de Localização de Máxima Cobertura (PLMC).

### 1.1.1 Objetivos Específicos

Através do modelo proposto, este trabalho pretende atingir os seguintes objetivos:

- Avaliar os ganhos da modelagem integrada do problema em comparação com modelos não integrados, através da análise de instâncias-teste em termos de atendimento da demanda e do nível de contratação de mão-de-obra e de aquisição de novos equipamentos.
- Avaliar os atendimentos das demandas para diferentes cenários de distância máxima de deslocamento do paciente, número de centros e equipamentos disponíveis para compra e de vulnerabilidade social.
- Avaliar a quantidade mínima de CEMs que maximiza o atendimento da demanda por especialidade médica, e a quantidade mínima de equipamentos necessários para cobrir a demanda máxima por exame.
- Avaliar *tradeoff* de atendimento entre as especialidades e equipamentos por meio do modelo integrado.

## 1.2 Estrutura da Dissertação

Esse trabalho está estruturado da seguinte forma: O capítulo 2 faz um exame da literatura destacando as principais contribuições ao problema abordado. O capítulo seguinte apresenta a metodologia de pesquisa, descrevendo a coleta de informações, os modelos matemáticos e um exemplo de sua aplicação com análise de instâncias-teste. Os resultados das análises do problema real são apresentados no capítulo 4. Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e recomendações de trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Revisão de Literatura

A decisão sobre a localização de facilidades tem importância reconhecida desde o momento em que fatores de desenvolvimento econômico, como o preço das terras e os custos com transporte entre os locais de produção e consumo eram considerados [15]. A localização de facilidades se enquadra no conceito de integração logística determinante na competitividade das empresas [66]. A decisão de localização faz parte do planejamento de longo prazo, que deve considerar mudanças no cenário econômico e transformações dinâmicas que possam ocorrer ao longo do tempo [53]. O termo facilidade refere-se a todo tipo de instalação física, como depósitos, centros de distribuição, antenas, escolas, hospitais, ambulâncias, entre outras.

Este capítulo apresenta um exame da literatura sobre os problemas recentes e relevantes de localização e alocação de facilidades aplicados à saúde, considerando questões como a equidade social e abordagens de solução do problema de forma integrada.

### 2.1 Problemas de Localização de Facilidade

A localização de facilidades vem sendo estudada por pesquisadores como Fermat já no século XVII, que determinou a localização ótima de um ponto central minimizando a distância entre outros três pontos [44]. O conceito de teoria da localização foi formalizado em 1909. Nele, o objetivo é minimizar os custos com transporte entre um armazém e clientes distribuídos no espaço [10]. A partir de então, trabalhos desenvolvidos sobre a teoria da localização tem sido realizados em conjunto com o progresso de ferramentas analíticas, estatísticas e computacionais [13].

Os estudos clássicos de localização podem ser categorizados a partir de diferentes tipos de modelos discretos em que pontos candidatos a receberem uma facilidade estão distribuídos no espaço geográfico, como os problemas baseados na cobertura e os problemas baseados na mediana [28]. Os problemas de cobertura surgem em contextos principalmente emergenciais nos quais o tempo ou distâncias são relevantes. Nesses problemas, uma demanda é considerada coberta quando encontram-se dentro da distância (tempo) de cobertura estabelecida. O modelo de cobertura é classificado em três tipos principais: os problemas de cobertura de conjuntos, da máxima cobertura, e  $p$ -centro.

O modelo de cobertura de conjuntos foi apresentado em 1971 e tem como objetivo atender todos os pontos de demanda minimizando o número de facilidades a serem ins-

taladas [62]. O problema considera que a demanda só pode ser atendida dentro de uma distância máxima pré-estabelecida de forma que todos os pontos de demanda sejam atendidos com o menor número de facilidades. O problema  $p$ -centro, foi introduzido em 1964 e visa encontrar o número  $p$  de facilidades que minimiza a distância máxima (ou tempo) entre todos os pontos de demanda [33] [25].

O PLMC foi introduzido em 1974 e surge a partir do modelo de cobertura de conjuntos ao considerar que nem toda a demanda pode ser atendida por limitação orçamentária [23]. O modelo prioriza atender pontos com alta demanda para obter maior cobertura total. O problema tem como objetivo maximizar a cobertura da demanda garantindo que o número de facilidades abertas seja menor ou igual a quantidade previamente definida. Uma demanda é considerada coberta por facilidades quando estas encontram-se a uma distância menor que a distância máxima estipulada. Esse tipo de problema possui muitas aplicações na área de saúde, como em estudos recentes em que há preocupação com o atendimento da população [57] [36] [63] [7].

A noção de cobertura é bem estabelecida nas aplicações de trabalhos na área da saúde. Em alguns casos, porém, o interesse do tomador de decisão está em determinar a distância mínima que um paciente ou profissional da saúde deve locomover para receber ou realizar o atendimento. Assim, os modelos baseados na mediana surgem para encontrar a menor distância de deslocamento. Um dos principais modelos dessa classe é o problema da  $p$ -Mediana.

O problema da  $p$ -Mediana define a mediana ou centróide de um grafo  $G(V,A)$ , em que  $V$  representa o conjunto de vértices e  $A$  representa o conjunto de arestas. O objetivo é encontrar os vértices onde as facilidades serão instaladas de modo que a soma das distâncias entre os vértices seja a menor possível. Os primeiros trabalhos formais sobre este problema foram desenvolvidos em 1964 e 1965 [33] [34].

Nos serviços de saúde, os problemas de localização são utilizados para determinar a localização, a quantidade e a capacidade de recursos visando a maximização do benefício à sociedade. Os estudos com aplicações dos problemas de localização podem ser categorizados de acordo com o tipo de serviço de saúde: emergenciais, preventivo, e planejamento. No Brasil, modelos matemáticos de localização tem se destacado como ferramentas úteis auxiliando decisões sobre o planejamento dos gastos públicos no setor da saúde [51] [60] [59] [31].

Os problemas com abordagem de serviços emergenciais determinam a quantidade e a localização de facilidades para atender o máximo da demanda. O primeiro trabalho de localização de facilidades emergenciais ocorre em 1971 abordando a cobertura de conjuntos [62]. Destaca-se para esse tipo de serviço a importância de se considerar as adversidades geográficas e populacionais que podem interferir na realização do atendimento. Para isso, foram desenvolvidos modelos contendo probabilidades de ocorrência de eventos [14].

Na saúde preventiva, o objetivo maior é reduzir as chances de aquisição de doenças através do diagnóstico antecipado. As decisões são relacionadas ao número de instalações e suas localizações, preocupando-se em assegurar a participação máxima dos pacientes e não apenas com a distância a ser percorrida para ter acesso a facilidade [64].

A análise de localização de facilidades na saúde considera alguns critérios essenciais: a acessibilidade, a adaptabilidade e a disponibilidade [26]. Por acessibilidade entende-se como a habilidade do paciente alcançar um local de atendimento ou pelo serviço responsável pelo atendimento ir de encontro ao paciente, como no caso de médicos ou ambulâncias.

O aumento da acessibilidade proporciona aumento da equidade social. Além disso, a melhor distribuição das facilidades proporciona a diminuição dos custos de deslocamento. O aumento na acessibilidade pode ocorrer de duas formas principais: (i) redistribuindo facilidades existentes ou determinando a localização de novas instalações, e (ii) pela melhoria da eficácia da rede de transporte público [55]. Por adaptabilidade, entende-se pela flexibilidade de adaptação da localização às condições futuras e flutuações da demanda, em que são usados modelos probabilísticos. Exemplos incluem a determinação do número e localização de ambulâncias para atender níveis de demanda que oscilam ao longo do dia [26] [20].

A disponibilidade, ao contrário da adaptabilidade, avalia decisões de curto prazo quando uma facilidade torna-se indisponível. A inclusão desse critério na modelagem matemática é muito utilizada em serviços de emergência, em que dois eventos podem acontecer ao mesmo tempo tornando indisponível o atendimento de um deles. Para abordar esse fator, modelos com mais de um raio de cobertura são propostos, sendo parte da demanda atendida dentro do raio de cobertura maior e a outra parte pelo raio menor, aumentando a chance de atendimento de uma demanda por uma facilidade disponível [26].

Critérios adicionais são usados para determinar a localização de unidades de saúde, como a relação de oferta e procura, as normas regulamentadoras de saúde, a disponibilidade de mão-de-obra, energia, água, tratamento de resíduos e a consideração da desigualdade de acesso a saúde [65]. Essas questões são consideradas neste estudo. A seção 2.2 aborda a questão da equidade nos modelos de localização de facilidades.

## 2.2 Equidade nos Problemas de Localização

Uma característica particular dos problemas de localização de facilidades no setor público é a equidade, definida como a igualdade de acesso da utilização do sistema de saúde [67]. Em modelos de programação matemática, a equidade é o resultado de ações entre diferentes grupos baseados em suas características [9]. A equidade é um conceito abstrato político-social que faz referência a justiça e classifica a alocação de recursos a partir de três características: paridade, proporcionalidade e prioridade. Por paridade, os usuários devem ser tratados igualmente. A proporcionalidade significa que os recursos devem ser divididos de acordo com as necessidades de cada usuário. Finalmente, o conceito de prioridade determina que o usuário em pior condição de saúde deve ter acesso priorizado ao atendimento. Como as desigualdades sociais são representadas por diferentes necessidades é preciso cuidado na associação dos pesos às características [70]. A equidade é geralmente quantificada como a minimização da medida de desigualdade [45] [11] [9].

A política do SUS baseia-se no cumprimento de diretrizes que obedecem os princípios de universalidade de acesso à saúde, de integralidade, entendida como as ações contínuas de atendimento à saúde, de igualdade de acesso, e de descentralização política-administrativa entre as esferas federal, estadual e municipal [17]. Essa porém não é uma tarefa fácil. Neste trabalho, a desigualdade é evidenciada pela atual má distribuição espacial de estabelecimentos de saúde, equipamentos e médicos que se concentram nas regiões mais desenvolvidas e populosas do estado [37]. Assim, a abordagem de equidade é trabalhada através de um parâmetro de nível de serviço no atendimento dos municípios [19].

Para isso, os indicadores socioeconômicos de Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), Índice de Gini, e Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) são analisados na seção 2.2.1.

## 2.2.1 Indicadores Socioeconômicos

### 2.2.1.1 Índice de Desenvolvimento Humano

O IDH, idealizado pelo economista paquistanês Mahbub ul Haq com a colaboração do economista Amartya Sen, foi apresentado em 1990 pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento [49]. Um dos objetivos de sua criação foi contrapor o indicador de Produto Interno Bruto (PIB) que considera apenas o desenvolvimento na esfera econômica.

O IDH considera três dimensões básicas do desenvolvimento humano: a renda bruta *per capita*, a educação e a saúde [49]. O índice varia de zero a um. Quanto mais próximo de um, maior é o desenvolvimento humano local. O IDH é dividido nas seguintes faixas: de zero a 0.499 muito baixo; 0.500 a 0.599 baixo; 0.600 a 0.699 médio; de 0.700 a 0.799 alto; e de 0.800 a 1 muito alto. O programa das Nações Unidas encoraja a adaptação deste índice para a realidade de cada país [49].

### 2.2.1.2 Índice de Gini

O Índice de Gini foi elaborado pelo matemático italiano Conrado Gini em 1912 com intuito de medir o grau de concentração de renda em determinado grupo [68]. Sua escala varia de zero a um, sendo o valor zero uma situação de completa igualdade. Na prática, o Índice de Gini compara a população entre os 20% mais pobres e os 20% mais ricos [61].

### 2.2.1.3 Índice de Vulnerabilidade Social

O IVS surgiu a partir do estudo dos indicadores do Atlas do Desenvolvimento Humano (ADH) no projeto de mapeamento da vulnerabilidade social nas regiões metropolitanas do Brasil pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). O indicador é calculado para todos os municípios brasileiros e regiões metropolitanas e busca indicar os municípios mais vulneráveis servindo de auxílio aos gestores de políticas públicas. A noção de exclusão e vulnerabilidade busca entender a pobreza como as reais necessidades da população indo além da insuficiência material e de renda [24]. O IVS classifica os municípios nas seguintes faixas de vulnerabilidade social: de 0 a 0.200 muito baixa; de 0.201 e 0.300 baixa; 0.301 e 0.400 média; 0.401 e 0.500 alta e entre 0.501 e 1 muito alta. O índice é composto por três subíndices:

1. Infraestrutura urbana: mede os serviços de saneamento básico e mobilidade urbana. Para analisar o serviço de saneamento básico avalia-se a presença de redes de abastecimento de água, de serviços de esgotamento sanitário e coleta de lixo. Para analisar a mobilidade urbana, avalia-se o tempo gasto no deslocamento entre a moradia e o local de trabalho de baixa renda.

2. Capital humano: mede a saúde e a educação através dos indicadores de mortalidade infantil, absenteísmo nas escolas, mães precoces, chefes de família com baixa escolaridade e com filhos menores, adultos com baixa escolaridade, e desempregados por domicílio.
3. Renda e trabalho: mede o percentual de domicílios com renda *per capita* inferior a um salário mínimo (ano de 2010), adultos desempregados, adultos pouco escolarizados em trabalho informal, adultos dependentes da renda de pessoas idosas e o trabalho infantil.

Neste trabalho, o *IVS* é adotado na avaliação de grupos socioeconômicos por ser a medida que mais se aproxima de critérios de mobilidade urbana e saúde. Além disso, o índice contempla aspectos sociais, tornando o problema mais próximo do contexto real.

## 2.3 Modelos Integrados de Localização de Facilidades

O presente trabalho tem como foco os modelos integrados de localização que incorporam decisões táticas e operacionais além das considerações de longo prazo. Em estudos de 1980, há a incorporação de características operacionais de facilidades móveis como a probabilidade de congestionamento em estratégias de localização ótima [27] [30] [54].

A ideia de integrar localização e alocação de facilidades foi iniciada em 1979 em um estudo abordando a localização de corpo de bombeiros e alocação de equipamentos e mão-de-obra simultaneamente [56]. Os modelos integrados caracterizam-se por serem de difícil resolução e apresentam grandes oportunidades de estudo [8] [40]. Os maiores desenvolvimentos nessa área ocorreram a partir dos anos 2000, com o avanço computacional [40]. A partir de então, surgiram abordagens aplicadas a cadeia de suprimentos com modelos que visam, por exemplo, a localização e o posicionamento de estoques [58], a localização e o roteamento de veículos [21]. No entanto, aplicações no setor de energia, transporte e saúde são ainda mais recentes [39] [52] [22].

Tabela 2.1: Trabalhos com abordagem integrada de localização de facilidades.

Referência	Limitação de distância	Limitação de recursos	Recursos existentes	Caracte. municípios candidatos	Inserção equidade social	Análise <i>trade-off</i>	Aplicação real
Branas, Mackenzie e Revelle (2000) [16]	x	x	x				x
Mak, Rong e Shen (2013) [39]	x	x					
Cho, Jang, Lee e Tuener (2014) [22]	x	x					x
Demelle, Thill, Peters e Thomas (2014) [29]	x	x	x			x	x
Cardoso, Oliveira, Barbosa-Póvoa, e Nickel (2015) [19]	x	x	x		x		x
Mestre, Oliveira e Barbosa-Póvoa (2015) [42]	x	x	x	x		x	x
Qi, Liang e Shen (2015) [52]		x	x	x			x

Embora a proposta de localização de facilidade e alocação de equipamentos não seja muito recente, poucos estudos abordam aplicações reais considerando suas peculiaridades e complexidades. A Tabela 2.1 aborda fatores relevantes para as decisões de localização e alocação em estudos com abordagem integrada. Estudos recentes não consideram todos esses fatores simultaneamente como neste trabalho. Destacam-se os trabalhos de [19] e [42] pela incorporação da maioria dos fatores considerados neste estudo. Em trabalho desenvolvido em Portugal o objetivo é planejar a entrega de serviço de saúde de longo-prazo (pacientes que sofrem de doenças crônicas e deficiências) de forma a minimizar o custo total esperado, considerando equidade de acesso, de utilização, socioeconômica e geográfica [19]. Apesar de tratar múltiplas equidades, o problema não considera as características dos municípios aptos a receber uma facilidade. Este fator de características dos municípios candidatos é importante por selecionar os locais com condições de infraestrutura para manutenção de um hospital e de maior atratividade de mão-de-obra, visto que um dos desafios do governo é a falta de médicos especialistas em regiões menos desenvolvidas. Além disso, o trabalho não explora a análise de *trade-off* entre as decisões como será realizado no modelo do presente estudo com análise entre a ponderação das decisões de atendimento da demanda por médico e exames.

Em outro estudo também realizado em Portugal os autores consideram incertezas de demanda no processo de definição da rede de planejamento dos hospitais, tendo como objetivo a definição dos locais para instalação de hospitais para a melhoria de acesso geográfico com o menor custo possível [42]. Este trabalho desenvolve um modelo com as decisões de localização e alocação em dois estágios, considerando dependência entre as decisões e modelo com um único estágio considerando que as decisões não são dependentes. Neste trabalho há inclusão de restrição de municípios candidatos através de população mínima e equidade de acesso geográfico pela minimização do deslocamento ponderado pela demanda, porém não é tratada a equidade socioeconômico adotando-se nível mínimo de atendimento para grupo mais vulnerável como em [19] e no presente estudo. Em ambos os estudos investigados ([19] e [42]), o objetivo é a minimização de custos. No presente trabalho, a proposta de maximização do atendimento surge como diferencial dado que trata-se da saúde pública e o principal objetivo é a busca que universalização do acesso.

A abordagem desta pesquisa surge como uma oportunidade de desenvolvimento de aplicação real em um problema de grande porte considerando todos esses fatores em MG, o estado com maior número de municípios do país. O objetivo é resolver um problema real pela adaptação do modelo clássico PLMC às necessidades do estado através da adição de restrições capazes de representar as particularidades do problema. As restrições consideram os desafios de equidade, o fluxo de deslocamento dos usuários, a seleção dos municípios aptos a receber um CEM e/ou equipamento, o atendimento da demanda em um raio pré-determinado e a interdependência entre médicos e equipamentos.

# Capítulo 3

## Metodologia de Pesquisa

Esta pesquisa é um estudo de caso de localização de facilidades para melhoria da qualidade da saúde à nível secundário para o estado de Minas Gerais. A metodologia de estudo consiste em: determinar as informações necessárias, realizar o levantamento e tratamento dos dados, definir a abrangência do modelo, desenvolver formulações matemáticas para localização de CEMs e alocação de equipamentos, propor uma modelagem integrada abrangendo os dois problemas simultaneamente, comparar a abordagem integrada com a não-integrada e analisar os resultados do modelo integrado para o estado de MG.

Propõe-se, dessa forma, a formulação de três modelos. Denominamos o primeiro modelo de localização de CEM como MLCEM, cujo objetivo é determinar as localizações ótimas dos CEMs maximizando o atendimento da demanda por especialidades médicas. O segundo modelo, que visa a alocação ótima de equipamentos, é denominado MAEQU. O terceiro modelo denominado MLACE, integra decisões de localização ótima de CEMs e alocação de equipamentos simultaneamente avaliando a interdependência entre eles.

### 3.1 Levantamento de Dados

Essa etapa do trabalho consiste em determinar, coletar e organizar as informações necessárias para a modelagem do problema. Os dados foram obtidos do DATASUS [3] e do IBGE [5]. Foram levantados os seguintes dados para as 77 regiões de saúde do estado:

- Número de médicos que prestam serviço pelo SUS;
- Os municípios de cada região de saúde;

O número de médicos disponíveis é obtido pelo DATASUS. A oferta de cada especialidade médica é disponibilizada por região de saúde. No entanto, a demanda por especialidade médica é contabilizada por município, dessa forma, construiu-se uma matriz binária atribuindo valor 1 aos municípios pertencentes a cada região de saúde. Os municípios pertencentes a cada região de saúde é fornecido pelo DATASUS [3]. Em seguida, foram levantados os seguintes dados para os 853 municípios de MG:



- População;
- Número de horas de atendimento médico aferida em cada especialidade;
- Número de equipamentos disponíveis;
- Indicador de Vulnerabilidade Social;
- Distância entre os municípios;

O número de horas de atendimento médico aferida para cada especialidade é confrontado com a demanda, ou seja, a necessidade de atendimento de cada especialidade médica por município. Essa por sua vez, é baseada na população e na Portaria 1631, de 01 de outubro de 2015, do Ministério da Saúde [43]. Os dados da população foram estimados para o ano de 2015 com base no último censo do IBGE de 2010 [5]. Assim foram levantadas as seguintes informações:

- Demanda por especialidades médicas em cada município;
- Demanda por exame em equipamentos médicos por município;

A demanda por médicos em cada especialidade e município é determinada pela Equação 3.1 que relaciona a taxa de atendimento médico semanal pela população de cada município. Denominamos "taxa" o número de médicos estabelecidos pela portaria 1631 para atender a população a um nível aceitável. Para cada cem mil habitantes são necessárias as seguintes quantidades de médicos para cada especialidade: 6.5 cardiologistas; 1.5 endocrinologistas; 25 ginecologistas; 25 pediatras; 1 mastologista; 4 oftalmologistas; 3 urologistas, 2.6 nefrologistas; e 1.5 angiologistas. O número de médicos é multiplicado por 40 horas semanais, referente a carga horária de trabalho de um médico. A SES-MG estima que 50% dessa demanda já é atendida pela infraestrutura existente formada por unidades básicas de saúde, unidades de média complexidade e hospitais. No entanto, essa é uma estimativa inicial que deve ser refinada.

$$Demanda_{espec.} = \frac{Taxa}{100000hab.} \times Pop. \times 40 \frac{horas}{sem.} \times 0.5 \quad (3.1)$$

A demanda por equipamentos médicos também é estabelecida pela Portaria 1631 [43]. Por essa diretriz devem ser realizados 30 exames de ressonância a cada mil habitantes (taxa equivalente a 0.03), 3347 exames de tomografia a cada cem mil habitantes (taxa equivalente a 0.03347), 150 exames anuais a cada mil habitantes são realizados no ultrassom convencional (taxa equivalente a 0.150). Para esses três equipamentos, a quantidade de exames por ano é calculada multiplicando-se a população do município pela taxa equivalente, conforme demonstrado na Equação 3.2.

$$Demanda_{equi} = Taxa_{equi} \times Pop. \times 0.5 \quad (3.2)$$

Para o ultrassom doppler, a quantidade de exames a cada cem mil habitantes é representada pela quantidade de gestantes de alto risco em cada município. O valor é

calculado conforme apresentado na Equação 3.3: multiplica-se a porcentagem de nascidos vivos no estado (1.28%), pelo fator de ajuste fornecido pela portaria 1631 (1.05), por 15% que representa a porcentagem das gestantes de alto risco, e pelo tamanho da população analisada.

$$Demanda_{uld} = \frac{1.28}{100} \times 1.05 \times \frac{15}{100} Pop \times 0.5 \quad (3.3)$$

A quantidade de exames realizadas no mamógrafo a cada cem mil habitantes é apresentado pela Equação 3.4. Este valor é obtido pela soma da representatividade de mulheres entre 40-49 anos (6.72%) multiplicado pelo fator de utilização do equipamento para essa faixa etária (20%) e a quantidade de habitantes, mais a representatividade das mulheres entre 50-59 anos, multiplicado pelo fator de utilização do equipamento para essa faixa etária (58.9%) e a quantidade de habitantes.

$$Demanda_{mam} = \left( \frac{6.72}{100} \times \frac{20}{100} \times Pop. \right) + \left( \frac{5.82}{100} \times \frac{58.9}{100} \times Pop. \right) \times 0.5 \quad (3.4)$$

Os parâmetros de demanda e oferta são convertidos em horas por semana para estimar a capacidade, visto que um especialista equivale a 40 horas de atendimento por semana, enquanto que estima-se uma hora de atendimento por exame. Dessa forma, o número de médicos especialistas disponíveis em cada região de saúde é multiplicado por 40. A necessidade de contratação médica ocorre quando a proposta de atendimento da demanda para cada especialidade na região de saúde é superior à oferta de horas de especialistas mesmo após a otimização.

A capacidade disponível dos equipamentos médicos hospitalares do SUS é obtida através do número de equipamentos existentes por município, levantada a partir do banco de dados do DATASUS [3], multiplicado por sua capacidade produtiva conforme a portaria 1631. A capacidade produtiva de ressonância é de 5000 exames/ano, do tomógrafo é 7000 exames/ano, do mamógrafo 6758 exames/ano, do ultrassom convencional 3024 exames/ano enquanto que em um ultrassom doppler podem ser realizados 3024 exames/ano. Deste valor são deduzidos os atendimentos dos equipamentos em cada município, visto que interessa apenas o atendimento da demanda não coberta.

A decisão de alocação de um equipamento está atrelada à decisão de localização e atendimento da demanda por especialidade médica. Assim, é necessário estabelecer uma relação de dependência entre a especialidade médica e o equipamento através de exames requisitados pelas especialidades que utilizam determinados equipamentos, conforme apresentado na Tabela 3.1. Atribui-se valor 1 aos equipamentos utilizados pelas especialidades médicas e zero caso a especialidade e o equipamento não tenham relação. As informações de relação entre especialidades e equipamentos foram fornecidas pela equipe do NESCON-UFMG.

O IVS foi obtido pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) para cada município no ano de 2015 [6]. Ao passo que a distância entre municípios foi obtida através de um API para consulta de distâncias do mapas do Google<sup>TM</sup> [4]. A etapa subsequente do trabalho consiste em estabelecer as premissas do problema.

Tabela 3.1: Relação especialidade e equipamento: [1]: Mamógrafo, [2]: Ressonância Magnética, [3]: Tomógrafo, [4]: ultrassom Convencional, [5]: Ultrassom Doppler.

Especialidade	Equipamento				
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
Cardiologia	0	1	1	0	1
Pediatria	0	1	1	1	1
Ginecologia	1	1	1	1	1
Endocrinologia	0	1	1	1	0
Mastologia	1	1	1	1	1
Nefrologia	0	1	1	1	1
Oftalmologia	0	1	1	1	1
Angiologia	0	1	1	0	1
Urologia	0	1	1	1	0

Fonte: NESCON-UFMG (2017).

## 3.2 Considerações do Problema

A localização de CEMs e a alocação de equipamentos a estes centros devem atender as restrições impostas pela Secretaria de Saúde de MG. Dessa forma, a demanda de um município deve ser atendida inteiramente em um único CEM aberto. O atendimento médico no equipamento deve priorizar a população onde ele está instalado. A demanda total dos municípios mais vulneráveis, deve ser atendida baseado no *IVS* e em um nível mínimo de serviço.

O modelo deve considerar o fluxo da população, que sai de municípios de menor população para aqueles mais populosos. Um CEM só pode ser instalado em municípios com infraestrutura mínima e capaz de atrair médicos. O município candidato deve ter pelo menos 30 mil habitantes e um histórico de atendimento em no mínimo 3 especialidades médicas. O local de instalação de um CEM deve ser definido considerando um deslocamento máximo do paciente, que está distribuído geograficamente por todo o estado.

No caso da demanda exceder a oferta de especialidades médicas deve-se considerar a opção de contratação adicional de médico ou de exames. No caso de exames, o decisor pode optar por comprar exames através de contratos com a rede privada ou em adquirir novos equipamentos. Os exames extras necessários só podem ser adquiridos em um município com CEM.

## 3.3 Modelagem Matemática

A localização ótima de CEMs deve considerar os deslocamentos dos pacientes para maximizar o atendimento da demanda nas especialidades médicas. Por isso propõe-se a formulação do problema de localização ótima de CEM representado por *MLCEM*. Uma vez instalados, é preciso equipar os CEMs para atender a demanda por exames médicos. A alocação de equipamentos deve ser baseada nas demandas por exames, que também encontram-se geograficamente dispersas pelo estado. Para isso, propõe-se a formulação do modelo de alocação ótima de equipamentos aos CEMs, representado por *MAEQU*. Esse último tem os resultados do modelo *MLCEM* como parâmetros de entrada. No entanto, essa estratégia pode levar a resultados subótimos quando a demanda por exames é muito representativa. Por isso, propõe-se uma abordagem integrada, representada pela nomenclatura *MLACE*, que avalia a localização de CEMs e alocação de equipamentos

de forma simultânea. Os conjuntos, parâmetros e variáveis usados nas formulações são apresentados nas Tabelas 3.2-3.4.

Tabela 3.2: Conjuntos das formulações propostas

Conjuntos	
$J$	: Municípios destino (CEM).
$I_1$	: Subconjunto dos municípios menos vulneráveis socialmente.
$I_2$	: Subconjunto dos municípios mais vulneráveis socialmente.
$I = I_1 \cup I_2$	: Municípios origem (demanda). Equivale a todos os 853 municípios de MG.
$E$	: Especialidades médicas.
$M$	: Regiões de Saúde.
$Q$	: Equipamentos.

Tabela 3.3: Parâmetros das formulações propostas

Parâmetros		Unid.
$DM_{ie}$	: Demanda por especialidade médica $e$ do município $i$ .	(hs/sem)
$DE_{iq}$	: Demanda por exame no equipamento $q$ do município $i$ .	(hs/sem)
$D_{ij}$	: Distância entre o município $i$ e $j$ .	(km)
$PE_j \in \{0, 1\}$	: 1, se produção aferida em no mínimo 3 especi. por município $j$ .	(binário)
$NC$	: Número máximo de CEMs a serem abertos.	(escalar)
$NE_q$	: Número de equipamentos $q$ disponíveis para aquisição.	(escalar)
$P_i$	: População de cada município $i$ .	(pessoas)
$P_{min}$	: População mínima de um município candidato.	(pessoas)
$D_{max}$	: Distância máxima de deslocamento do paciente.	(km)
$R_{jm} \in \{0, 1\}$	: 1, se o município $j$ pertence a região de saúde $m$ .	(binário)
$O_{me}$	: Horas disponíveis na especialidade $e$ por região de saúde $m$ .	(hs/sem)
$IVS_i$	: Indicador de Vulnerabilidade Social por município $i$ .	(escalar)
$ES$	: Porcentagem da demanda atendida de $I_2$ .	(porc.)
$K_{jq}$	: Disponibilidade de exames por município $j$ e equipamento $q$ .	(hs/sem)
$C_q$	: Capacidade nominal do equipamento $q$ .	(hs/sem)
$MX_{eq} \in \{0, 1\}$	: 1, se especialidade $e$ utiliza equipamento $q$ .	(binário)

Tabela 3.4: Variáveis das formulações propostas

Variáveis		Unid.
$l_{ej}$	: Demanda alocada a um município $j$ por especialidade $e$ .	(hs/sem)
$h_{me}$	: Horas adicionais por região de saúde $m$ e especialidade $e$ .	(hs/sem)
$x_{ije}$	: Se a demanda do município $i$ na especialidade $e$ é ou não atendida em $j$ .	(binário)
$y_j$	: Se o CEM é ou não instalado no município $j$ .	(binário)
$v_{ijq}$	: Se a demanda do município $i$ por exame $q$ é ou não atendida em $j$ .	(binário)
$w_{jq}$	: Horas adicionais de exames por município $j$ e equipamento $q$ .	(hs/sem)

### 3.3.1 Modelo de Localização - MLCEM

O MLCEM tem como objetivo determinar a localização dos CEMs maximizando a demanda atendida nas especialidades médicas racionalizando a necessidade de contrata-

ção de horas adicionais dessas especialidades. Para isso, considera-se um número pré-determinado de CEMs, uma distância máxima de deslocamento de pacientes e nível de serviço mínimo para o atendimento da demanda dos municípios mais vulneráveis. O modelo matemático proposto, é formulado da maneira como segue.

A função objetivo (3.5) maximiza o atendimento da demanda racionalizando a contratação de horas adicionais de especialidades médicas por região de saúde.

$$\text{Max} \quad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{e \in E} DM_{ie} x_{ije} - \sum_{m \in M} \sum_{e \in E} h_{me} \quad (3.5)$$

As restrições do modelo proposto são definidas da seguinte maneira:

**Alocação da demanda** As equações de (3.6)-(3.8) determinam a alocação da demanda de atendimento por especialidade médica aos CEMs. A restrição (3.6) assume que cada especialidade  $e$  de cada município  $i$  deve ser atendida por algum CEM, não sendo necessário que toda a demanda seja atendida. A restrição (3.7) garante que a demanda da especialidade  $e$  do município  $i$  seja alocada apenas aos CEMs abertos. Pela restrição (3.8), os municípios que possuem um CEM devem alocar sua própria demanda à ele.

$$\sum_{j \in J} x_{ije} \leq 1 \quad \forall i \in I, e \in E \quad (3.6)$$

$$x_{ije} - y_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, e \in E \quad (3.7)$$

$$x_{jje} - y_j = 0 \quad \forall j \in J, e \in E \quad (3.8)$$

**Abertura de instalações** A restrição (3.9) limita a quantidade de CEMs em função do orçamento do estado.

$$\sum_{j \in J} y_j \leq NC \quad (3.9)$$

**Capacidade e alocação de recursos** As restrições (3.10) e (3.11) determinam a alocação da demanda por especialidade médica conforme a oferta de horas de especialistas disponível em cada região de saúde. Em (3.10) tem-se o valor da demanda total atendida em cada município por especialidade atribuído à variável auxiliar  $l_{ej}$ . A equação (3.11) garante que a quantidade de horas semanais de um CEM pertencente a região de saúde  $m$  deve respeitar a disponibilidade de horas disponíveis na região. Em caso de demanda excedente, pode haver a contratação de horas semanais complementares  $h_{me}$ . No entanto, as horas adicionais por especialidade são racionalizadas na função objetivo.

$$\sum_{i \in I} DM_{ie} x_{ije} = l_{ej} \quad \forall j \in J, e \in E \quad (3.10)$$

$$\sum_{j \in J: R_{jm}=1} l_{ej} \leq O_{me} + h_{me} \quad \forall m \in M, e \in E \quad (3.11)$$

**Fluxo de pacientes** A realidade sobre o fluxo mostra que historicamente os pacientes se deslocam de municípios menos populosos para aqueles mais populosos. Essa particularidade é captada pela restrição (3.12).

$$P_i x_{ije} \leq P_j x_{ije} \quad \forall e \in E, i \in I, j \in J \quad (3.12)$$

**Municípios candidatos** As restrições (3.13) e (3.14) limitam o conjunto de municípios candidatos a receberem um CEM ao impor que um município só pode ser escolhido se possuir produção aferida em um número mínimo de especialidades médicas (3.13) e população maior que um valor mínimo estabelecido (3.14). O intuito da adoção dessas restrições é flexibilizar a seleção dos municípios que possuem diferentes características de produção em especialidades médicas e população.

$$PE_j \geq y_j \quad \forall j \in J \quad (3.13)$$

$$P_j \geq P_{min} y_j \quad \forall j \in J \quad (3.14)$$

**Distância máxima de deslocamento** A restrição (3.15) determina que o deslocamento de pacientes não deve ultrapassar o deslocamento máximo  $D_{max}$  entre o ponto de demanda  $i$  e o de atendimento  $j$ . A restrição visa evitar o tratamento desigual dos pacientes dentro de um limite de distância previamente acordado.

$$D_{ij} x_{ije} \leq D_{max} \quad \forall i \in I, j \in J, e \in E \quad (3.15)$$

**Equidade Socioeconômica** A discussão de equidade é de extrema relevância quando se trata de localização de facilidades públicas. Um dos princípios adotados pelo SUS é garantir o acesso igual considerando as desigualdades existentes. Neste estudo, as diferenças socioeconômicas, de disponibilidade de médicos especialistas e de hospitais de média e alta complexidade são evidenciadas nas diferentes regiões do estado. Assim, a proposta da restrição (3.16) é considerar a questão da desigualdade socioeconômica através do indicador  $IVS$  para cada município. Este parâmetro é utilizado para dividir o conjunto  $I$  de todos os municípios em dois grupos socioeconômicos: o subconjunto  $I_1$ , dos município com valor menor que o  $IVS$  estabelecido, correspondente aos municípios menos vulneráveis socialmente, e o subconjunto  $I_2$ , dos municípios mais vulneráveis socialmente, com valor de  $IVS$  maior que o estabelecido.

O valor escolhido como limitante foi definido em 0.301 por se encontrar na faixa de vulnerabilidade média de acordo com o Atlas de Vulnerabilidade Social [6]. Assim, pela restrição (3.16) de atendimento da demanda por especialidade médica do grupo  $I_2$  deve atender um nível mínimo de equidade social.

$$\frac{\sum_{i \in I_2, j \in J} DM_{ie} x_{ije}}{\sum_{i \in I_2} DM_{ie}} \geq ES \quad \forall e \in E \quad (3.16)$$

**Domínio das variáveis** Por fim, as restrições (3.17)-(3.20) determinam o domínio das variáveis do problema.

$$x_{ije} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J, e \in E \quad (3.17)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (3.18)$$

$$l_e \geq 0 \quad \forall j \in J, e \in E \quad (3.19)$$

$$h_{me} \geq 0 \quad \forall m \in M, e \in E \quad (3.20)$$

### 3.3.2 Modelo de Alocação - MAEQU

Uma vez que a localização dos CEMs foram definidas é preciso alocar os equipamentos aos CEMs. O MAEQU determina como deve ser feita a alocação de equipamentos ao atribuir a demanda por exames aos CEMs e instalações de saúde com capacidade disponível. O objetivo é maximizar o atendimento em exames e racionalizar a contratação de exames adicionais. Para isso, a formulação considera a capacidade disponível, a distância máxima de deslocamento permitido e a relação de dependência entre as demandas atendidas em especialidade médica e o equipamento daquela especialidade.

A função objetivo (3.21) do modelo maximiza o atendimento da demanda por exames médicos realizados nos equipamentos, racionalizando a quantidade de exames adicionais. Uma demanda é considerada coberta quando encontra-se dentro da distância máxima de deslocamento entre o equipamento utilizado no exame médico e o paciente. As restrições do modelo proposto são definidas da seguinte maneira:

$$\text{Max} \quad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{q \in Q} DE_{iq} v_{ijq} - \sum_{j \in J} \sum_{q \in Q} w_{jq} \quad (3.21)$$

**Alocação da demanda** A equação (3.22) assume que cada equipamento  $q$  de cada município  $i$  deve ser atendida por algum município  $j$ , não sendo necessário que toda a demanda seja atendida. A restrição (3.23) garante que a demanda por equipamento  $q$  do município  $i$ , seja alocada apenas à municípios com capacidade ou CEMs.

$$\sum_{j \in J} v_{ijq} \leq 1 \quad \forall i \in I, q \in Q \quad (3.22)$$

$$v_{ijq} \leq y_j \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q : K_{jq} = 0 \quad (3.23)$$

**Aquisição de equipamentos** A restrição (3.24) determina que os exames adicionais são limitados pela capacidade nominal dos equipamentos disponíveis para compra. Mesmo assim, os exames adicionais só podem ser realizados nos municípios em que os CEMs foram instalados como apresentado na restrição (3.25).

$$\sum_{j \in J} w_{jq} \leq NE_q C_q \quad \forall q \in Q \quad (3.24)$$

$$w_{jq} \leq NE_q C_q y_j \quad \forall j \in J, q \in Q \quad (3.25)$$

**Capacidade e alocação de recursos** A restrição (3.26) determina a alocação da demanda por equipamento conforme a disponibilidade de recursos. A demanda total atendida por equipamento deve ser menor ou igual a capacidade existente. É possível adquirir novos exames, no entanto, essa decisão é racionalizada na função objetivo.

$$\sum_{i \in I} DE_{iq} v_{ijq} \leq K_{jq} + w_{jq} \quad \forall j \in J, q \in Q \quad (3.26)$$

**Restrição de fluxo** Para garantir que os usuários se desloquem no sentido de maior fluxo, e não o contrário, é adicionada a restrição (3.27).

$$P_i v_{ijq} \leq P_j v_{ijq} \quad \forall q \in Q, i \in I, j \in J \quad (3.27)$$

**Distância máxima de deslocamento** O deslocamento máximo para receber um atendimento é limitado em  $D_{max}$  conforme a restrição (3.28).

$$D_{ij} v_{ijq} \leq D_{max} \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q \quad (3.28)$$

**Relação da demanda atendida por especialidade e equipamento** As restrições (3.29)-(3.32) relacionam o atendimento médico de um especialista com um exame realizado em um equipamento. A restrição (3.29) garante que a quantidade de exames realizados nos equipamentos deve ser menor que a quantidade de atendimento em médicos especialistas. Adota-se uma premissa de que cada atendimento médico pode gerar o encaminhamento de no máximo um exame no equipamento. Cada equipamento é considerado atendido somente se possui relação com pelo menos uma especialidade médica atendida de cada município, como assegurado pela restrição (3.30), porém um equipamento pode servir a mais de uma especialidade. Pela Equação (3.31), se um município  $j$  não recebe um CEM e não possui capacidade de atendimento ele não pode receber demanda por exames. Por fim, a restrição (3.32) prioriza o atendimento em exames no próprio município quando ele possui capacidade disponível no equipamento. Na abordagem não-integrada,  $x_{ije}$  e  $y_j$  são tratados como parâmetros de entrada a partir do resultado de MLCM.



$$\sum_{j \in J, q \in Q} v_{ijq} \leq \sum_{e \in E, j \in J} x_{ije} \quad \forall i \in I \quad (3.29)$$

$$\sum_{j \in J} v_{ijq} \leq \sum_{e \in E, j \in J} x_{ije} MX_{eq} \quad \forall i \in I, q \in Q \quad (3.30)$$

$$v_{ijq} MX_{eq} \leq x_{ije} MX_{eq} \quad \forall i \in I, j \in J, e \in E, q \in Q : K_{jq} = 0 \quad (3.31)$$

$$v_{ijq} \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q : i \neq j \quad K_{iq} \geq 0 \quad (3.32)$$

**Domínio das variáveis** As restrições (3.33) e (3.34) apresentam o domínio das variáveis do modelo.

$$v_{ijq} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q \quad (3.33)$$

$$w_{jq} \geq 0 \quad \forall j \in J, q \in Q \quad (3.34)$$

### 3.3.3 Modelo Integrado de Localização e Alocação - MLACE

A proposta do modelo integrado MLACE é determinar a localização ótima dos CEMs e a alocação ótima dos equipamentos simultaneamente, maximizando o atendimento em especialidades médicas, a realização de exames e racionalizando a quantidade de contratação adicional de médicos e exames. O modelo MLACE considera o deslocamento máximo do paciente, um número de CEMs a ser instalado e de equipamentos a ser adquiridos, a relação entre as demandas atendidas e os locais de instalação dos CEMs, assim como nos modelos MLCEM e MAEQU. Seu diferencial no entanto, consiste em usar variáveis de decisão para localização dos CEMs e alocação da demanda por especialidades médicas aos CEMs juntamente com o processo decisório de alocação de equipamento. Enquanto, o MAEQU utiliza como parâmetros de entrada as variáveis  $x_{ije}$  e  $y_j$  resultantes da decisão do MLCEM. O modelo é apresentado como segue:

$$\text{Max} \quad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{e \in E} DM_{ie} x_{ije} - \sum_{m \in M} \sum_{e \in E} h_{me} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{q \in Q} DE_{iq} v_{ijq} - \sum_{j \in J} \sum_{q \in Q} w_{jq} \quad (3.35)$$

sujeito à : (3.6) – (3.16) (3.22) (3.24) (3.26) (3.27) (3.28) (3.32)

$$v_{ijq} \leq y_j \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q : K_{jq} = 0 \quad (3.36)$$

$$w_{jq} \leq NE_q C_q y_j \quad \forall j \in J, q \in Q \quad (3.37)$$

$$\sum_{j \in J, q \in Q} v_{ijq} \leq \sum_{e \in E, j \in J} x_{ije} \quad \forall i \in I \quad (3.38)$$

$$\sum_{j \in J} v_{ijq} \leq \sum_{e \in E, j \in J} x_{ije} MX_{eq} \quad \forall i \in I, q \in Q \quad (3.39)$$

$$v_{ijq} MX_{eq} \leq x_{ije} MX_{eq} \quad \forall i \in I, j \in J, e \in E, q \in Q : K_{jq} = 0 \quad (3.40)$$

$$x_{ije} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J, e \in E \quad (3.41)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (3.42)$$

$$l_{ej} \geq 0 \quad \forall j \in J, e \in E \quad (3.43)$$

$$h_{me} \geq 0 \quad \forall m \in M, e \in E \quad (3.44)$$

$$v_{ijq} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q \quad (3.45)$$

$$w_{jq} \geq 0 \quad \forall j \in J, q \in Q \quad (3.46)$$

A função objetivo (3.35) maximiza o atendimento da demanda por especialidade médicas e exames racionalizando a contratação de horas adicionais de atendimento médico e de exames. A restrição (3.36) garante que para os municípios que não possuem disponibilidade de equipamento, a demanda por exame seja alocada apenas aos CEMs, uma vez que novos equipamentos são adquiridos apenas nos CEMs, como apresentado na restrição (3.37). A restrição (3.38) assegura que a quantidade de exames realizados nos equipamentos para cada município não ultrapasse os atendimentos de médicos especialistas. Por sua vez, a restrição (3.39) garante que a demanda atendida por exame em um equipamento seja relativa à apenas um atendimento médico. Por fim, a restrição (3.40) garante que um município sem disponibilidade de exames e sem um CEM não atenda em exames. O domínio das variáveis são apresentados nas Equações (3.41)–(3.46), que apresentam  $x_{ije}$  e  $y_j$  como variáveis no MLACE.

### 3.3.4 Exemplo Numérico

Esta seção apresenta um exemplo numérico, com dados fictícios, para demonstrar didaticamente a aplicação dos modelos e comparar os resultados obtidos. O exemplo, ilustrado na Figura 3.1, é composto por quatro municípios (círculos), ligados por arestas que representam a distância em quilômetros entre eles, e duas regiões de saúde. A Tabela 3.5 mostra a composição dos conjuntos e a identificação utilizada no exemplo numérico.

Tabela 3.5: Elementos exemplo numérico.

Elemento	Identificação
Municípios	$M_1, M_2, M_3, M_4$
Região de Saúde	$R_1, R_2$
Municípios Vulneráveis	$M_1$
Especialidades Médicas	$E_1, E_2, E_3$
Equipamentos	$Q_1, Q_2$

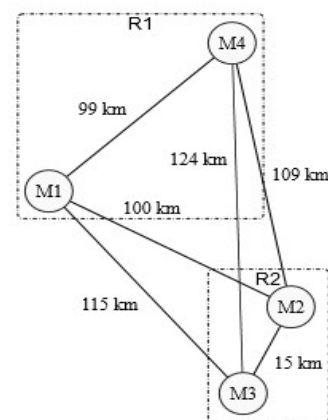


Figura 3.1: Ilustração exemplo numérico.

Nesse exemplo, após a classificação do conjunto dos municípios em dois subconjuntos, dos menos e mais vulneráveis socialmente através do IVS, o município  $M_1$  é o único contido

no subconjunto dos mais vulneráveis ( $I_2$ ). Os CEMs podem ser instalados nos municípios com população mínima de cem habitantes e produção aferida em no mínimo uma das três especialidades médicas. Estas adaptações nos critérios dos municípios candidatos são válidas para o exemplo numérico, para a aplicação real adota-se 30 mil habitantes e produção aferida em três das nove especialidades médicas. As demandas por especialidades médicas e por exames realizados nos equipamentos em cada município são apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Demandas por médicos e exames por município.

Município	Demanda por Médicos (horas/semana)			Demanda por Exames (horas/semana)	
	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$Q_1$	$Q_2$
$M_1$	2	5	5	25	20
$M_2$	3	10	10	40	35
$M_3$	1	5	5	15	10
$M_4$	10	25	25	50	45

Cada município pertence a uma região de saúde conforme apresentado na Tabela 3.7. As regiões de saúde por sua vez, disponibilizam determinada quantidade de horas semanais do especialista, apresentadas na Tabela 3.8. As capacidades disponíveis de exames por equipamento de cada município são apresentadas na Tabela 3.9. Há ainda a possibilidade de contratação de médicos e de aquisição de novos equipamentos caso os recursos disponíveis não atendam a demanda máxima obtida. Porém, um equipamento só pode ser adquirido nos municípios em que os CEMs são instaladas. O limite de CEMs a ser aberto é de 1 e o número máximo de equipamentos disponíveis para compra é de 1 para  $Q_1$  e 2 para  $Q_2$ .

Tabela 3.7: Município por região de saúde.

Município	Região de Saúde	
	$R_1$	$R_2$
$M_1$	1	0
$M_2$	0	1
$M_3$	0	1
$M_4$	1	0

Tabela 3.8: Disponibilidade especialista.

Região de Saúde	Especialidade (horas/semana)		
	$E_1$	$E_2$	$E_3$
$R_1$	1	1	1
$R_2$	5	10	5

Tabela 3.9: Disponibilidade exames.

Município	Equipamento (horas/semana)	
	$Q_1$	$Q_2$
$M_1$	10	15
$M_2$	15	0
$M_3$	0	15
$M_4$	20	5

O deslocamento máximo permitido nesse exemplo é de 100 quilômetros e o fluxo de movimentação do paciente para receber um atendimento ocorre dos municípios meno-

res populacionalmente para os municípios maiores. As populações dos municípios estão descritas na Tabela 3.10. A matriz de equipamentos utilizados por cada especialidade encontra-se na Tabela 3.11, todos as especialidades utilizam ambos equipamentos.

Tabela 3.10: População por município.

Município	População (habitantes)
$M_1$	150
$M_2$	250
$M_3$	100
$M_4$	300

Tabela 3.11: Equipamentos utilizados pelas especialidade médicas.

Especialidade	Equipamento (horas/semana)	
	$Q_1$	$Q_2$
$E_1$	1	1
$E_2$	1	1
$E_3$	1	1

O objetivo do modelo é maximizar o atendimento da demanda por médicos e equipamentos, racionalizando o uso de recursos adicionais. O problema é resolvido pelos modelos MLCEM, MAEQU e MLACE. Os resultados são apresentados na Tabela 3.12.

Tabela 3.12: Resultado função objetivo modelo não-integrado x integrado.

MLCEM e MAEQU		MLACE	
$Z_{final} = 20 + 0 = 20$		$Z_{final} = 20 + 25 = 45$	
MLCEM : $Z = 20$	MAEQU: $Z = 0$	MLCEM = 20	MAQUE = 25
Atend.-Esp. = 35	Atend.-Exames= 0	Atend.-Esp. = 46	Atend.-Exames= 25
Horas-Adi. = 15	Exames-Adi. = 0	Horas-Adi. = 26	Exames-Adi. = 0

O MLCEM escolhe instalar o CEM no município  $M_2$ , já que nele maximiza a demanda por especialidade médica contratando o menor número possível de horas semanais. Nenhuma hora adicional é necessária para a  $E_1$ , 5 horas são necessárias para  $E_2$  e 10 para  $E_3$ . A escolha do CEM em  $M_2$  resulta no atendimento dos municípios  $M_1$  e  $M_2$  em todas as especialidades. Em seguida, o modelo MAEQU opta por não atender nenhum municípios, visto que possui seria necessária a adição de elevada horas de exames.

O MLACE determina que a instalação de um CEM deve ocorrer também em  $M_2$ , atendendo os municípios  $M_1$ ,  $M_2$  e  $M_3$  em todas as especialidades. Como resultando, foram atendidos ao todo 46 horas/semanais, sendo necessária a contratação de 26 horas semanais, sendo 1 hora para a especialidade  $E_1$ , 10 para  $E_2$  e 15 para a  $E_3$ . Ao atender  $M_3$  o MLACE supera a abordagem não-integrada, verificando a viabilidade de atendimento de  $M_3$  nos equipamentos  $Q_1$  e  $Q_2$  por possuir capacidade disponível. Como resultado, atende um total de 25 exames, sem adição de horas de exame, para o exame que utiliza o equipamento  $Q_1$ ,  $M_3$  é atendido em  $M_2$  e para  $Q_2$  é atendido nele mesmo dado que existe capacidade disponível. Ao analisar os modelos quanto ao aproveitamento dos recursos disponíveis, verifica-se uma ociosidade de 100% em  $Q_1$  e  $Q_2$  no MAQUE. As Tabelas 3.13, 3.14 e 3.15 trazem os resultados obtidos para o município atendido (origem), onde foi atendido (destino) e a quantidade da demanda atendida para cada abordagem. A abordagem não-integrada não apresenta resultados para MAEQU, pois não houve atendimento em exames.

A realização dessa análise aplicada ao problema real é relevante e desafiadora dada a elevada dependência do estado por realização de exames em equipamentos da iniciativa privada. Essa dependência pode levar ao aumento do valor de mercado para realização

Tabela 3.13: Atendimento da demanda por especialidade médica - MLCEM

Origem	Destino	Especialidade	Demanda (horas/semana)	Distância (km)
$M_2$	$M_2$	$E_1$	3	0
$M_2$	$M_2$	$E_2$	10	0
$M_2$	$M_2$	$E_3$	10	0
$M_1$	$M_2$	$E_1$	2	100
$M_1$	$M_2$	$E_2$	5	100
$M_1$	$M_2$	$E_3$	5	100

Tabela 3.14: Atendimento da demanda por especialidade médica - MLACE

Origem	Destino	Especialidade	Demanda (horas/semana)	Distância (km)
$M_2$	$M_2$	$E_1$	3	0
$M_2$	$M_2$	$E_2$	10	0
$M_2$	$M_2$	$E_3$	10	0
$M_1$	$M_2$	$E_1$	2	100
$M_1$	$M_2$	$E_2$	5	100
$M_1$	$M_2$	$E_3$	5	100
$M_3$	$M_2$	$E_1$	1	15
$M_3$	$M_2$	$E_2$	5	15
$M_3$	$M_2$	$E_3$	5	15

Tabela 3.15: Atendimento da demanda por exames - MLACE

Origem	Destino	Equipamento	Demanda (horas/semana)	Distância (km)
$M_3$	$M_2$	$Q_1$	15	15
$M_3$	$M_3$	$Q_2$	10	0

de exames na rede privada dado o baixo poder de barganha do estado e atendimentos de baixa qualidade. Assim, essa análise permite verificar o melhor custo benefício para o governo e trazer melhorias na qualidade de atendimento da população, transferindo os atendimentos e o investimento financeiro à própria população.

### 3.3.4.1 Análise Comparativa dos Modelos por Instâncias-Teste

Esta seção apresenta os resultados dos modelos para diferentes cenários baseados no exemplo numérico. Assim, foram planejados experimentos variando o número de CEMs, de equipamentos disponíveis para compra, a distância máxima de deslocamento, as horas disponíveis de especialistas e a capacidade disponível dos equipamentos. Para cada parâmetro atribuem-se duas configurações de valores conforme as Tabelas 3.16-3.19, totalizando 32 testes. A identificação dos testes estão apresentadas na Tabela 3.20.

Tabela 3.16: Número de CEMs e distância máxima.

Config.	$NC$	$D_{max}$ (km)
1	1	100
2	2	125

Tabela 3.17: Número de equipamentos disponíveis para compra.

Config.	Equip.	Qtd.
1	$Q_1$	1
	$Q_2$	2
2	$Q_1$	2
	$Q_2$	1

A variação no número de CEMs, simula a instalação de um e de dois CEMs considerando os municípios candidatos. A distância máxima adota um valor de 100 km impossibilitando o atendimento entre  $M_4$  e  $M_2$ ,  $M_4$  e  $M_3$  e  $M_1$  e  $M_3$ . O aumento da distância

Tabela 3.18: Disponibilidade de exames.

Config	Município	Equipamento (horas/semana)	
		$Q_1$	$Q_2$
1	$M_1$	10	15
	$M_2$	15	0
	$M_3$	0	15
	$M_4$	20	5
2	$M_1$	10	15
	$M_2$	20	5
	$M_3$	0	15
	$M_4$	15	0

Tabela 3.19: Disponibilidade de especialistas.

Config	Região de Saúde	Especialidade (horas/semana)		
		$E_1$	$E_2$	$E_3$
1	$R_1$	1	1	1
	$R_2$	5	10	5
2	$R_1$	5	10	5
	$R_2$	1	1	1

máxima para 125 km tem como intuito simular um cenário com maiores possibilidades de atendimento, passando a permitir deslocamento e alocação de demanda entre todos os municípios. A variação para a disponibilidade de médicos e equipamentos simulou cenários com trocas entre as ofertas nas regiões de saúde e nos municípios. A disponibilidade de compras para cada tipo de equipamento simulou no primeiro cenário aquisição máxima de um equipamento  $Q_1$  e dois para  $Q_2$  e um cenário oposto.

Tabela 3.20: Identificação dos testes.

Teste	$NC$	$NE_q$	$D_{max}$ (km)	$K_{jq}$	$O_{me}$
1	Config. 1	Config. 1	100	Config. 1	Config. 1
2	Config. 1	Config. 1	100	Config. 1	Config. 2
3	Config. 1	Config. 1	100	Config. 2	Config. 1
4	Config. 1	Config. 1	100	Config. 2	Config. 2
5	Config. 1	Config. 1	125	Config. 1	Config. 1
6	Config. 1	Config. 1	125	Config. 1	Config. 2
7	Config. 1	Config. 1	125	Config. 2	Config. 1
8	Config. 1	Config. 1	125	Config. 2	Config. 2
9	Config. 1	Config. 2	100	Config. 1	Config. 1
10	Config. 1	Config. 2	100	Config. 1	Config. 2
11	Config. 1	Config. 2	100	Config. 2	Config. 1
12	Config. 1	Config. 2	100	Config. 2	Config. 2
13	Config. 1	Config. 2	125	Config. 1	Config. 1
14	Config. 1	Config. 2	125	Config. 1	Config. 2
15	Config. 1	Config. 2	125	Config. 2	Config. 1
16	Config. 1	Config. 2	125	Config. 2	Config. 2
17	Config. 2	Config. 1	100	Config. 1	Config. 1
18	Config. 2	Config. 1	100	Config. 1	Config. 2
19	Config. 2	Config. 1	100	Config. 2	Config. 1
20	Config. 2	Config. 1	100	Config. 2	Config. 2
21	Config. 2	Config. 1	125	Config. 1	Config. 1
22	Config. 2	Config. 1	125	Config. 1	Config. 2
23	Config. 2	Config. 1	125	Config. 2	Config. 1
24	Config. 2	Config. 1	125	Config. 2	Config. 2
25	Config. 2	Config. 2	100	Config. 1	Config. 1
26	Config. 2	Config. 2	100	Config. 1	Config. 2
27	Config. 2	Config. 2	100	Config. 2	Config. 1
28	Config. 2	Config. 2	100	Config. 2	Config. 2
29	Config. 2	Config. 2	125	Config. 1	Config. 1
30	Config. 2	Config. 2	125	Config. 1	Config. 2
31	Config. 2	Config. 2	125	Config. 2	Config. 1
32	Config. 2	Config. 2	125	Config. 2	Config. 2

Os testes demonstram a superioridade do modelo integrado, cujo valor da função objetivo é maior ou igual à soma dos resultados dos modelos não-integrados para todos os 32 testes, como apresentado pelo gráfico da Figura 3.2.

O melhor resultado do MLACE superou a abordagem não-integrada em 70%, como verificado no teste seis. O melhor resultado do modelo integrado para esse cenário, assim

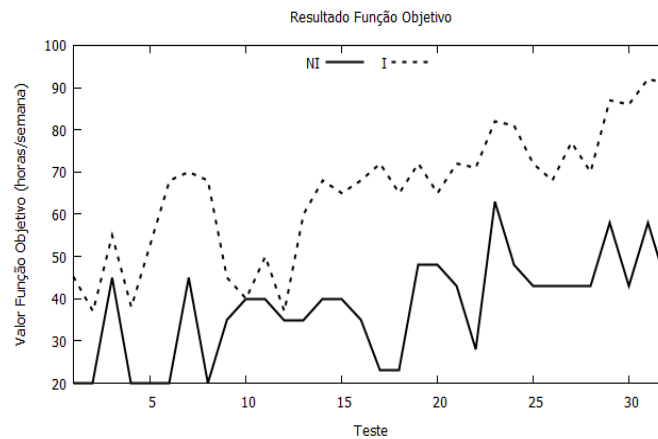


Figura 3.2: Resultado da função objetivo dos modelos não-integrado (NI) e integrado (I).

como na maioria dos casos, é justificado pela possibilidade do MLACE otimizar as decisões de localização e atendimento da demanda em especialidade médica, atentando sobre a demanda e a disponibilidade de recursos em exames. No cenário citado, ao visualizar que o município  $M_3$  e  $M_1$  possui capacidade disponível de exames, o modelo integrado opta por atender a demanda de  $M_3$  em especialidade médica e instalar o CEM em  $M_1$  para adicionar exames e atender toda a demanda por exames do próprio  $M_1$ . A abordagem não-integrada não consegue antecipar esse fato, já que em um primeiro momento apenas avalia a rentabilidade de atendimento da demanda por especialidade médica. Os gráficos das Figuras 3.3–3.6 apresentam os resultados de atendimento da demanda e de horas adicionais por especialidade médica e exames.

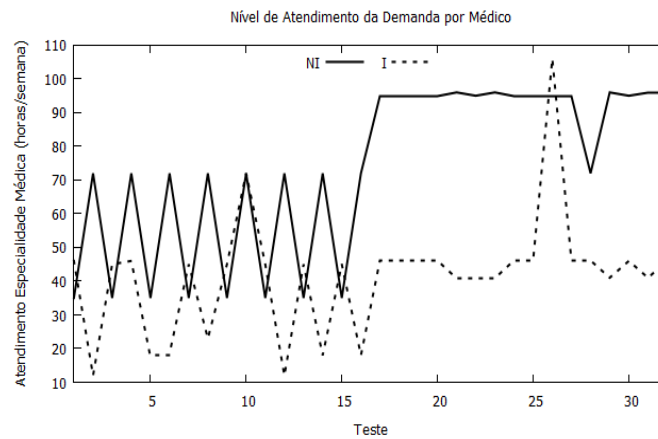


Figura 3.3: Demanda atendida por especialidade médica do modelo não-integrado (NI) e integrado (I).

Os gráficos da Figuras 3.3 e 3.5 apresentam na maioria dos teste maior cobertura da demanda por exames no modelo integrado. Enquanto para especialidade médica o modelo integrado supera com menor necessidade adicional de médicos. Tanto para médicos quanto exames, o nível de atendimento da demanda é acompanhado pela horas adicionais necessárias de médicos e exames, conforme apresentado nas Figuras 3.4 e 3.6. Observa-se em alguns testes também, melhor resultado do modelo não-integrado principalmente para especialidade médica, visto que para esta abordagem o primeiro objetivo é maximizar apenas o atendimento da demanda por médico. Porém, esse resultado individual não supera o modelo integrado quando comparado ao valor final da função objetivo.

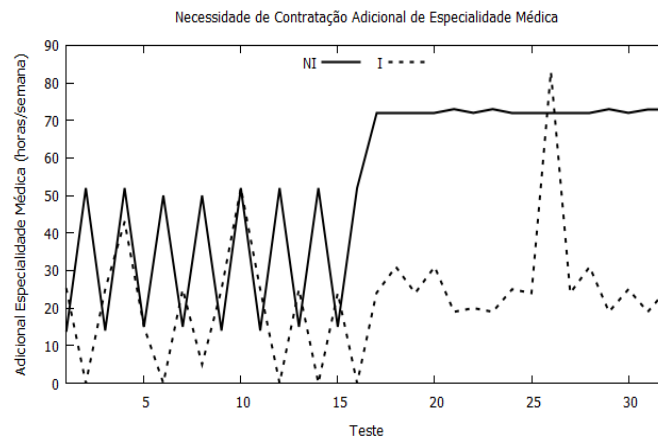


Figura 3.4: Horas adicionais de especialista do modelo não-integrado (NI) e integrado (I).

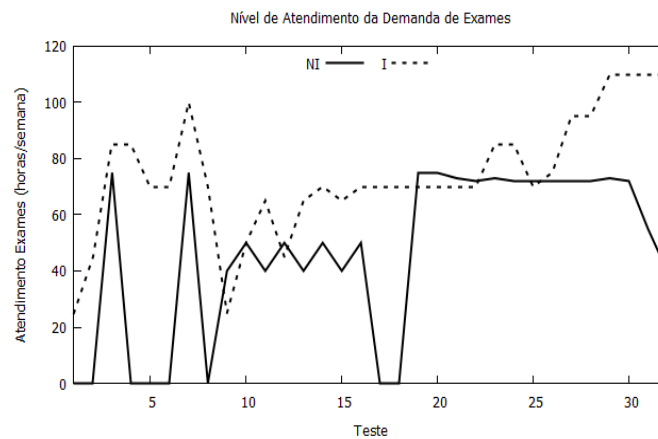


Figura 3.5: Demanda atendida de exames do modelo não-integrado (NI) e integrado (I).

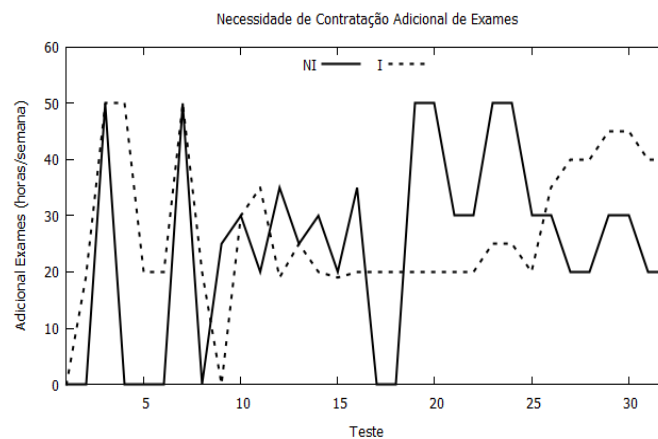


Figura 3.6: Horas adicionais de exames do modelo não-integrado (NI) e integrado (I).

A análise dos resultados dos experimentos permite concluir sobre a relação de dependência existente entre a definição de localização e a quantidade de equipamentos disponíveis para compra. Nesse exemplo numérico, ao aumentar  $NE_q$  de 1 para 2 (Tabela 3.17), o modelo integrado determina diferentes locais para instalação de um CEM e de diferentes municípios a serem atendidos em especialidade médica. Isto ocorre, pois este modelo



considera as informações sobre a quantidade e localizações de exames disponíveis para a tomada destas decisões. Esta observação ressalta a importância de considerar a decisão de localização de CEMs simultaneamente à de alocação de equipamentos [22].

# Capítulo 4

## Resultados e Discussões

Esta seção aborda os resultados obtidos para o modelo integrado de localização de CEMs e alocação de equipamentos aplicado ao problema proposto, visto que esse apresentou superior em relação aos modelos não-integrados. Além disso, após constatar a relação de interdependência entre as decisões, destaca-se a importância da aplicação do modelo integrado para flexibilizar a capacidade de cada facilidade de acordo com as reais necessidades evitando resultados subótimos.

As instâncias do modelo MLACE são planejados a partir da variação de parâmetros do problema que podem ser alterados na aplicação do contexto real. Em seguida, os resultados do MLACE são analisados quando adota-se uma quantidade de CEMs para instalação ( $NC$ ) e de equipamentos disponíveis para compra ( $P2_q$ ) necessários para garantir a cobertura máxima. Por fim, a última análise busca entender o comportamento do MLACE a partir de diferentes prioridades dada ao atendimento por especialidade e exames.

Os experimentos foram executados em um computador com sistema operacional Windows<sup>TM</sup> 64 bits, processador Intel(R) Core(TM) i7-6700U 3,40GHz e 16GB de memória RAM. O modelo matemático proposto foi implementado usando a linguagem de programação matemática AMPL<sup>TM</sup> e o solver Gurobi<sup>TM</sup> versão 7.5.0 para resolução do problema.

### 4.1 Análise de Cenários

O planejamento de experimentos tem como intuito criar diferentes instâncias e analisar os resultados do modelo [22]. Os cenários baseiam-se na variação de parâmetros relativos aos números de CEMs ( $NC$ ), número de equipamentos ( $NE_q$ ), de distância máxima de cobertura ( $D_{max}$ ) e de  $IVS$ , conforme apresentado na Tabela 4.1 e 4.2. Estes parâmetros foram escolhidos devido a possibilidade de modificação em um contexto real, com intuito de analisar os resultados do modelo quando submetidos à diferentes valores. Os parâmetros relativos à capacidade disponível de médicos, exames e demanda, por exemplo, são dados reais da saúde pública de MG, não sendo recomendado suas alterações.

A geração de instâncias adotou valores baseados na acessibilidade real do estado, variando-os de forma a obter cenários diferentes. O orçamento inicial do governo de MG prevê a instalação de 51 CEMs, assim, foram estipulados valores abaixo do disponível, correspondentes a 15 CEMs, um valor intermediário, de 45 CEMs e acima do disponível,

Tabela 4.1: Planejamento do experimento.

$NC$ (escalar)	$NE_q$ (escalar)	$D_{max}$ (km)	$IVS$ (escalar)
15	Config. 1	80	0.301
45	Config. 2	150	0.501
60		300	

Tabela 4.2: Identificação configuração de  $NE_q$ .

Config. $NE_q$	Equip.	Qtd.
1	Ressonância	3
	Tomógrafo	2
	Mamógrafo	1
	Ultrassom Convencional	2
	Ultrassom Doppler	2
2	Ressonância	25
	Tomógrafo	15
	Mamógrafo	10
	Ultrassom Convencional	17
	Ultrassom Doppler	20

de 60 CEMs. A Tabela 4.2 mostra a configuração do número de equipamentos disponíveis para compra, simulando um cenário de recursos escassos e outro com liberdade de aquisição. A distância máxima de cobertura variou entre o valor considerado meta de deslocamento do paciente para o estado, de 80 km, um valor intermediário, de 150 km e um valor duas vezes maior, de 300 km. Em relação ao  $IVS$ , as variações consideram a classe dos municípios com vulnerabilidade média e alta, maior que 0.301 e a classe dos municípios com vulnerabilidade alta, maior que 0.501.

As combinações dos parâmetros totalizam 36 testes. Os testes e resultados são apresentados na Tabela 4.3. A tabela apresenta os resultados da função objetivo composta pelos atendimentos em especialidade médica e exames, racionalizando as horas adicionais de especialistas e exames. Em todos os testes com distância máxima de deslocamento de 80 km, não se obtiveram resultados factíveis. A meta inicial do governo é atingir um deslocamento máximo dos pacientes de até 80 km [1]. Para atingir a meta é necessário aumentar o número de municípios candidatos a receber um CEM, flexibilizando o critério de classificação desses municípios. O critério deste estudo determina que um município candidato deve possuir no mínimo 30 mil habitantes e produção aferida em pelo menos 3 das 9 especialidades médicas, totalizando 116 municípios candidatos. Os valores adotados para a seleção dos municípios foram definidos com base em testes computacionais e análises realizadas juntamente a SES-MG, concluindo-se que para 30 mil habitantes e 3 especialidades municípios importantes regionalmente são considerados para a escolha de um CEM. A diminuição no número mínimo de habitantes para 20 mil mantendo produção aferida em pelo menos 3 especialidades, aumenta o número de municípios candidatos para 176. Assim, com 176 candidatos considerando o raio de 80 km, é necessário instalar 142 CEMs com atendimento de 92.4% da demanda por médico e 25.5% da demanda por exames. Dessa forma, o número de CEMs aumentaria 178.4% em relação aos 51 CEMs disponíveis no orçamento inicial. Entretanto, esta quantidade de CEM é inviável economicamente, pois implica em um investimento muito acima do estipulado pelo governo.

Os testes de 1 a 12 são referentes às variações de  $NC$  igual a 15, conforme apresentado na Tabela 4.3. Eles apresentam resultados inferiores devido ao menor valor para  $NC$ . Nestes testes, o aumento de  $D_{max}$  eleva significativamente o valor da função objetivo. Além disso, ao modificar  $NC$  de 15 para 45 mantendo o mesmo cenário (teste 2 para 14, por exemplo), observa-se ganho em termos de atendimento da demanda em aproximadamente 29% em especialidade médica e de 20% em exames. Assim, constata-se a relação de dependência e a alta sensibilidade do problema com o número de facilidades disponíveis para instalação e o raio de cobertura assim como verificado em outros resultados encontrados na literatura [22].

Tabela 4.3: Resultados dos experimentos: FO: Função Objetivo, A: Horas de atendimento médico, HAM: Horas adicionais de médico, E: Horas de atendimento de exames, HAE: Horas adicionais de exame.

Teste	NC	$NP_q$	IVS	$D_{max}$	FO	A	HAM	E	HAE
1	15	Config. 1	0.301	80	Não factível				
2	15	Config. 1	0.301	150	790959	216718	38319	615016	2456
3	15	Config. 1	0.301	300	1045654	276848	30480	808233	8947
4	15	Config. 1	0.501	80	Não factível				
5	15	Config. 1	0.501	150	876866	210288	16054	683106	474
6	15	Config. 1	0.501	300	1045410	250601	6685	802882	1388
7	15	Config. 2	0.301	80	Não factível				
8	15	Config. 2	0.301	150	790955	214512	36114	613760	1203
9	15	Config. 2	0.301	300	1044919	268043	24619	801598	103
10	15	Config. 2	0.501	80	Não factível				
11	15	Config. 2	0.501	150	876823	211905	17671	685304	2715
12	15	Config. 2	0.501	300	1044454	249269	1512	801862	373
13	45	Config. 1	0.301	80	Não factível				
14	45	Config. 1	0.301	150	996246	280687	21193	739690	2938
15	45	Config. 1	0.301	300	1080789	290441	11533	802152	271
16	45	Config. 1	0.501	80	Não factível				
17	45	Config. 1	0.501	150	996247	267996	8498	740397	3648
18	45	Config. 1	0.501	300	1080672	285793	7006	805058	3173
19	45	Config. 2	0.301	80	Não factível				
20	45	Config. 2	0.301	150	996210	282440	22983	740193	3440
21	45	Config. 2	0.301	300	1080699	289954	11138	802850	967
22	45	Config. 2	0.501	80	Não factível				
23	45	Config. 2	0.501	150	996266	269085	9573	743620	6866
24	45	Config. 2	0.501	300	1080746	287876	9015	806713	4828
25	60	Config. 1	0.301	80	Não factível				
26	60	Config. 1	0.301	150	1003560	288104	21705	745513	8352
27	60	Config. 1	0.301	300	1081187	291999	12690	802749	871
28	60	Config. 1	0.501	80	Não factível				
29	60	Config. 1	0.501	150	1003571	277819	11408	747867	10707
30	60	Config. 1	0.501	300	1081210	292035	12698	802371	498
31	60	Config. 2	0.301	80	Não factível				
32	60	Config. 2	0.301	150	1003569	288066	21655	739847	2689
33	60	Config. 2	0.301	300	1081254	288269	8882	804457	2590
34	60	Config. 2	0.501	80	Não factível				
35	60	Config. 2	0.501	150	1003548	280326	13933	744742	7587
36	60	Config. 2	0.501	300	1081208	291601	12259	803778	1912

Os testes de 13 a 24 são referentes às variações de  $NC$  igual a 45 e os testes de 25 a 36 a  $NC$  igual a 60, conforme a Tabela 4.3. Estes testes apresentaram pequena diferença nos resultados quando submetidos ao mesmo cenário. Entretanto, quando submetidos a diferentes distância máximas de cobertura, apresentaram maior alteração no valor da função objetivo. Ao comparar o teste 14 e 26, por exemplo, tem-se um aumento de 33.3% para  $NC$  acompanhados por um aumento de apenas 2.64% no atendimento da demanda por médico e de 0.7% no atendimento em exames. Esse fato indica que a partir de determinado valor, aumentar o número de CEMs pode não trazer melhorias significativas de atendimento da população. O mesmo é observado quanto a diferença de resultados em relação ao aumento de  $NE_q$ . Ao aumentar o número de equipamentos disponíveis para compra mantendo-se o mesmo cenário, como do teste 14 para o 20, há um aumento na cobertura de exame de apenas 0.09%. Estas observações são importantes, pois indicam que a partir de certo ponto, adquirir novos CEMs e novos equipamentos não aumenta o atendimento das demandas, ou seja, o gargalo não é mais o número de CEMs e equipamentos. Para esta questão, é necessário rever as demais imposições da realidade do problema, como a distribuição e racionalização dos recursos no estado e a flexibilização do raio de cobertura.

Ao comparar os resultados dos experimentos variando o valor de  $IVS$  de 0.301 para 0.501 em um mesmo cenário, observa-se que houve redução no atendimento da demanda

por especialidade médica e alteração dos municípios selecionados para receber um CEM. O aumento de *IVS* reduz o número de municípios contido no grupo dos mais vulneráveis uma vez que para *IVS* 0.301 considera-se os municípios de média a muito alta vulnerabilidade, enquanto para 0.501 apenas os de vulnerabilidade muito alta, modificando também a distribuição geográfica dos mesmos, concentrando-se nas regiões norte e nordeste do estado e de menor densidade demográfica, conforme apresentado pela Figura 4.1. Dessa forma, o atendimento da demanda por médicos da população é reduzido para manter o nível mínimo de atendimento superior a 90% para o grupo de municípios mais vulneráveis.

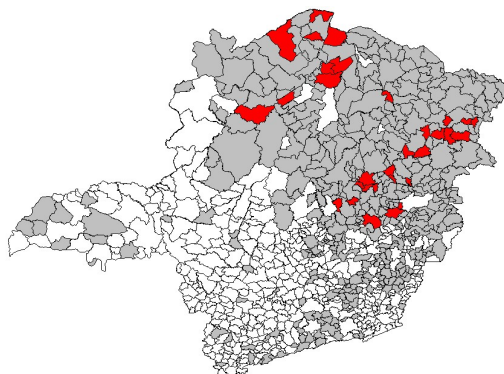
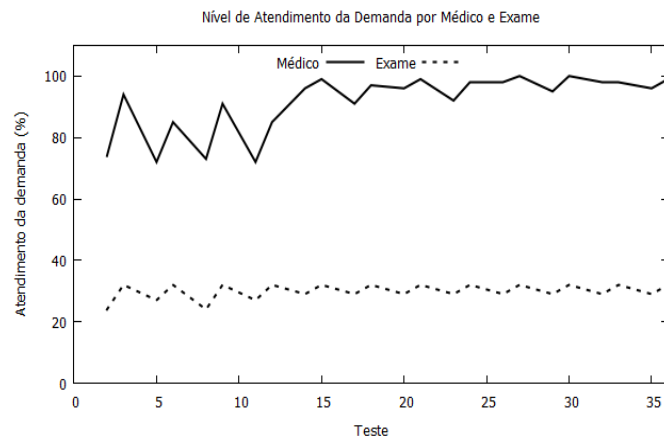


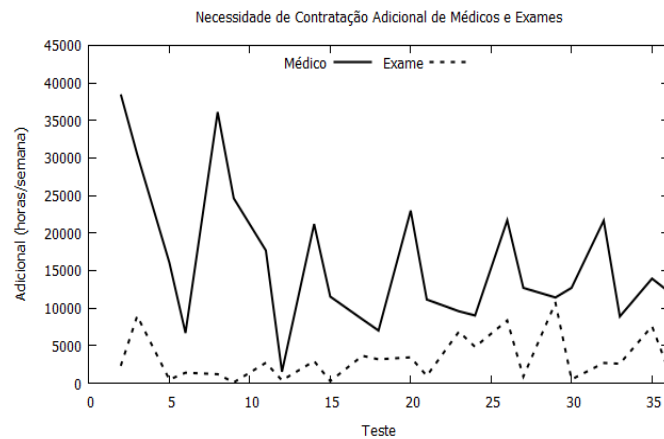
Figura 4.1: Municípios com *IVS* maior que 0.301, em cinza e maior que 0.501, em vermelho.  
Fonte: IPEA, (2010) [6].

Por fim, analisa-se os resultados do modelo quanto ao atendimento total das demandas e as horas adicionais para médicos e exames, conforme apresentado nas Figuras 4.2a e 4.2b. Pela Figura 4.2a, observa-se que o atendimento por médicos especialistas é acompanhado pelo atendimento em exames, ou seja, a quantidade da demanda atendida a priori em médico afeta a cobertura da demanda por exames devido a relação de dependência entre as demandas. A média de atendimento em médico e exames respectivamente é de 92% e 30%. O maior atendimento em especialidade médica é decorrente de um equilíbrio entre a demanda e a oferta dos especialistas, enquanto para exames essa relação apresenta maior discrepância para os equipamentos ultrassom convencional e mamógrafo, que exigem uma contratação adicional de respectivamente 94% e de 62% para atendimento de toda a demanda. A Figura 4.2b mostra a contratação de horas de especialistas e exames. Em média, é necessário contratar 3% além do disponível para especialidade médica e 1% para exames.

Após analisar diferentes cenários, percebe-se que o número de CEMs e a distância máxima de deslocamento do paciente são os fatores que mais influenciam o atendimento das demandas para os dados reais contemplados. Porém, em relação ao número de CEMs foi visto que aumentar o número de CEMs após certa quantidade pode não trazer ganhos significativos na cobertura da demanda. Em relação à distância máxima, o ganho em cobertura significa perda do nível de serviço em termos de deslocamento do paciente [29]. Estas observações mostram o impacto da variação de parâmetros no problema e da dependência existente entre as demandas e locais escolhidos para atendimento de médico e equipamentos, ressaltando a importância de tratar o problema de forma simultânea [29].



(a) Atendimento da demanda por médico e exames.



(b) Horas adicionais de especialistas e de exames.

Figura 4.2: Resultados separados para atendimento e horas adicionais de médicos e exames.

## 4.2 Análise Atendimento Máximo

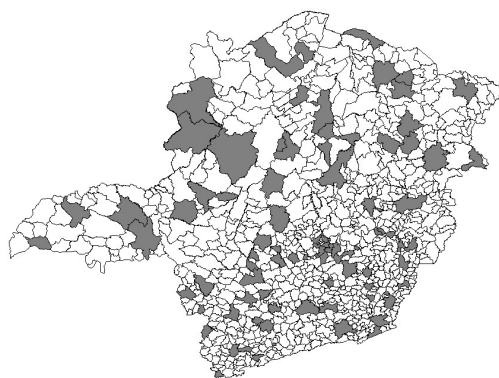
Um dos objetivos da pesquisa é dimensionar o número mínimo de unidades de saúde de nível secundário abastecidas com o número ideal de médicos e equipamentos de forma que atenda a demanda máxima em especialidade médica e exames. Para isso, o modelo foi submetido a um cenário extremo considerando um número máximo de CEMs ( $NC$ ), igual aos 116 municípios candidatos e mil equipamentos disponíveis para aquisição ( $NE_q$ ) para cada tipo de equipamento, adotando-se um raio de cobertura acordado por especialistas da medicina e da engenharia em 200 km e  $IVS$  de 0.301. Os resultados da função objetivo, com a demanda atendida em médicos e exames e a quantidade adicional de horas de atendimento em médicos e exames são apresentadas na Tabela 4.4. O modelo obteve um atendimento de 99.1% da demanda em especialidade médica com a necessidade de contratação de 19630 horas de especialistas, mas obteve baixo atendimento em demanda por exames, 32.4%, sendo necessária a adição de 44110 horas de exames.

Os municípios escolhidos para instalação dos CEMs e atendimento em exames são apresentados nas Figuras 4.3a e 4.3b. Foram escolhidos 80 CEMs para atendimento em especialidade médica, conforme mostra a Tabela 4.5, e 183 municípios para atendimento em exames. Os municípios escolhidos para atendimento em exames incluem aqueles já

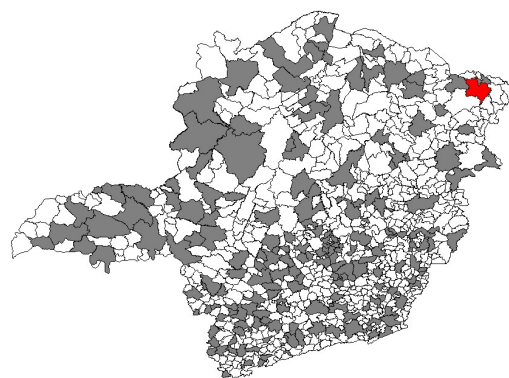
Tabela 4.4: Resultado função objetivo.

MLACE	
Demanda Atendida Esp. Médica	290613 (99.1%)
Horas Adicionais	19630
Demanda Atendida Exames	823041 (32.4%)
Exames Adicionais	44110
Total	1049914

com capacidade disponível em algum dos cinco equipamentos, equivalente a um total de 182 municípios destacados em cinza no mapa da Figura 4.3b. Em vermelho, destaca-se o único município a receber atendimento em exame que não possui capacidade disponível em nenhum dos cinco equipamentos considerados. Este município corresponde a Almenara, que foi selecionado como um CEM, portanto pode adquirir novos equipamentos.



(a) Municípios selecionados para receberem uma instalação de CEM em cinza.



(b) Municípios selecionados para receberem atendimento em exames em cinza e Almenara, em vermelho, o único que não possui capacidade disponível podendo adquirir novos equipamentos.

Figura 4.3: Municípios selecionados para receberem atendimento.

Os atendimentos das demandas em especialidade médica concentram-se nos CEMs de Belo Horizonte, Juiz de Fora e Uberlândia, conforme apresentado na Tabela 4.6, pois estes municípios encontram-se nas regiões de saúde com maior disponibilidade de médicos, como mostra a Figura 4.4a. A demanda total para cada CEM é composta pelas demandas de cada especialidade médica, como apresentado na Tabela 4.7, a título de exemplificação, para o município de Belo Horizonte.

O fluxo dos pacientes pode ser visualizado no mapa da Figura 4.5 para atendimento em especialidade médica em MG e no município de Almenara, localizado no nordeste do estado, Belo Horizonte, na região central e Uberlândia a oeste do estado no triângulo mineiro. Destaca-se o fluxo de pacientes por círculos proporcionais à demanda atendida de cada município. Os círculos menores representam as origens das demandas e o ponto central maior, o destino dos pacientes. Um exemplo da alocação do atendimento da demanda por médicos é representado pela capital do estado, disponível na Tabela A.1, apresentada no apêndice A.

A quantidade de municípios atendidos por faixas de demanda e a representatividade de suas demandas em relação a demanda total atendida e em relação ao total real, de 293.296 horas semanais, encontram-se na Tabela 4.8. Esta tabela mostra que mais de 98%

Tabela 4.5: Municípios selecionados para receberem uma instalação de CEM.

Item	Município	Item	Município	Item	Município
1	Além Paraíba	28	Ipatinga	55	Pirapora
2	Alfenas	29	Itajubá	56	Poços de Caldas
3	Almenara	30	Itaúna	57	Pompéu
4	Araçuaí	31	Ituiutaba	58	Ponte Nova
5	Arcos	32	Iturama	59	Pouso Alegre
6	Barbacena	33	Januária	60	Ribeirão das Neves
7	Belo Horizonte	34	João Monlevade	61	Rio Pardo de Minas
8	Boa Esperança	35	João Pinheiro	62	Sabará
9	Bocaiúva	36	Juiz de Fora	63	Salinas
10	Bom Despacho	37	Lagoa da Prata	64	Santa Bárbara
11	Brasília de Minas	38	Lagoa Santa	65	Santa Luzia
12	Caeté	39	Lavras	66	Santa Rita do Sapucaí
13	Campo Belo	40	Leopoldina	67	São João del Rei
14	Carangola	41	Manhuaçu	68	São Lourenço
15	Caratinga	42	Mariana	69	São Sebastião do Paraíso
16	Conselheiro Lafaiete	43	Minas Novas	70	Taiobeiras
17	Coronel Fabriciano	44	Montes Claros	71	Teófilo Otoni
18	Diamantina	45	Muriaé	72	Três Corações
19	Divinópolis	46	Nanuque	73	Três Marias
20	Espinosa	47	Nova Lima	74	Uberaba
21	Extrema	48	Nova Serrana	75	Uberlândia
22	Formiga	49	Novo Cruzeiro	76	Unai
23	Governador Valadares	50	Paracatu	77	Varginha
24	Guanhães	51	Passos	78	Várzea da Palma
25	Guaxupé	52	Patos de Minas	79	Viçosa
26	Ibirité	53	Patrocínio	80	Visconde do Rio Branco
27	Igarapé	54	Pedro Leopoldo		

Tabela 4.6: Atendimento médico em horas/semana por CEM.

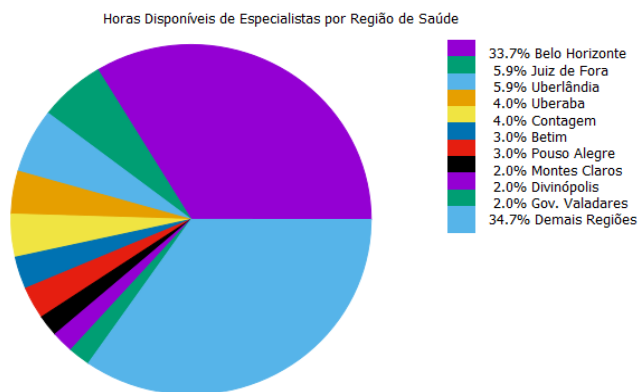
CEM	Demanda Alocada (hs./sem.)	CEM	Demanda Alocada (hs./sem.)	CEM	Demanda Alocada (hs./sem.)
Belo Horizonte	77861	Alfenas	2595	Pedro Leopoldo	1376
Juiz de Fora	17173	Ituiutaba	2528	Paracatu	1367
Uberlândia	16502	Diamantina	2514	Espinosa	1363
Montes Claros	9321	Mariana	2467	Rio Pardo de Minas	1355
Uberaba	7769	João Monlevade	2197	Nova Lima	1354
Governador Valadares	7301	Unai	2103	Carangola	1341
Ibirité	5552	Almenara	2050	Caeté	1269
Pouso Alegre	5477	São João del Rei	1995	Nanuque	1212
Ipatinga	5038	Sabará	1981	Minas Novas	1199
Ribeirão das Neves	4629	Pompéu	1953	Santa Rita do Sapucaí	1156
Poços de Caldas	4442	Ponte Nova	1950	Três Marias	1063
Januária	4219	Leopoldina	1948	João Pinheiro	1011
Patos de Minas	4171	Muriaé	1910	Bom Despacho	997
Teófilo Otoni	3764	Patrocínio	1902	Lagoa da Prata	990
Barbacena	3439	Araçuaí	1856	Campo Belo	977
Divinópolis	3432	Três Corações	1777	Boa Esperança	965
Varginha	3307	Visconde do Rio Branco	1705	Bocaiúva	959
Itajubá	3274	Viçosa	1670	Lagoa Santa	877
Santa Luzia	3105	Guaxupé	1591	Extrema	877
Passos	3100	Caratinga	1525	Iturama	834
Coronel Fabriciano	3079	Salinas	1520	Além Paraíba	793
Manhuaçu	3034	Nova Serrana	1509	Pirapora	784
Santa Bárbara	3028	Itaúna	1501	Guanhães	746
Lavras	2967	Brasília de Minas	1500	Várzea da Palma	682
São Lourenço	2812	São Sebastião do Paraíso	1460	Novo Cruzeiro	660
Conselheiro Lafaiete	2810	Igarapé	1448	Taiobeiras	557
Arcos	2684	Formiga	1423	<b>Total</b>	<b>290613</b>

da população de MG foi atendida em no mínimo 76% da demanda por médicos. Apenas o município de Formoso não foi atendido em especialidade médica, pois localiza-se no norte do estado na fronteira com Goiás onde não existe município candidato a instalação de um CEM a um raio de 200 km. A demanda atendida do grupo mais vulnerável foi de 97.9%,

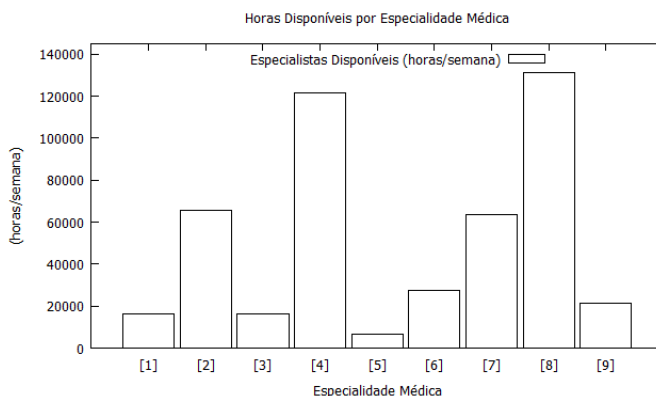


Tabela 4.7: Atendimento Médico em horas/semana por especialidade em Belo Horizonte: [1]: Angiologia, [2]: Cardiologia, [3]: Endocrinologia, [4]: Ginecologia, [5]: Mastologia, [6]: Nefrologia, [7]: Oftalmologia, [8]: Pediatria, [9]: Urologia, [T]:Total.

CEM	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[T]
Belo Horizonte	3541	7511	1713	26071	2085	4607	1691	29504	1140	77861



(a) Distribuição das 470.596 horas de médicos especialistas por região de saúde.



(b) Disponibilidade de horas de especialistas por especialidade médica.

Figura 4.4: Horas disponíveis de especialistas por região de saúde e por equipamento: [1]: Angiologia, [2]: Cardiologia, [3]: Endocrinologia, [4]: Ginecologia, [5]: Mastologia, [6]: Nefrologia, [7]: Oftalmologia, [8]: Pediatria, [9]: Urologia.

Fonte: DATASUS, (2015) [3].

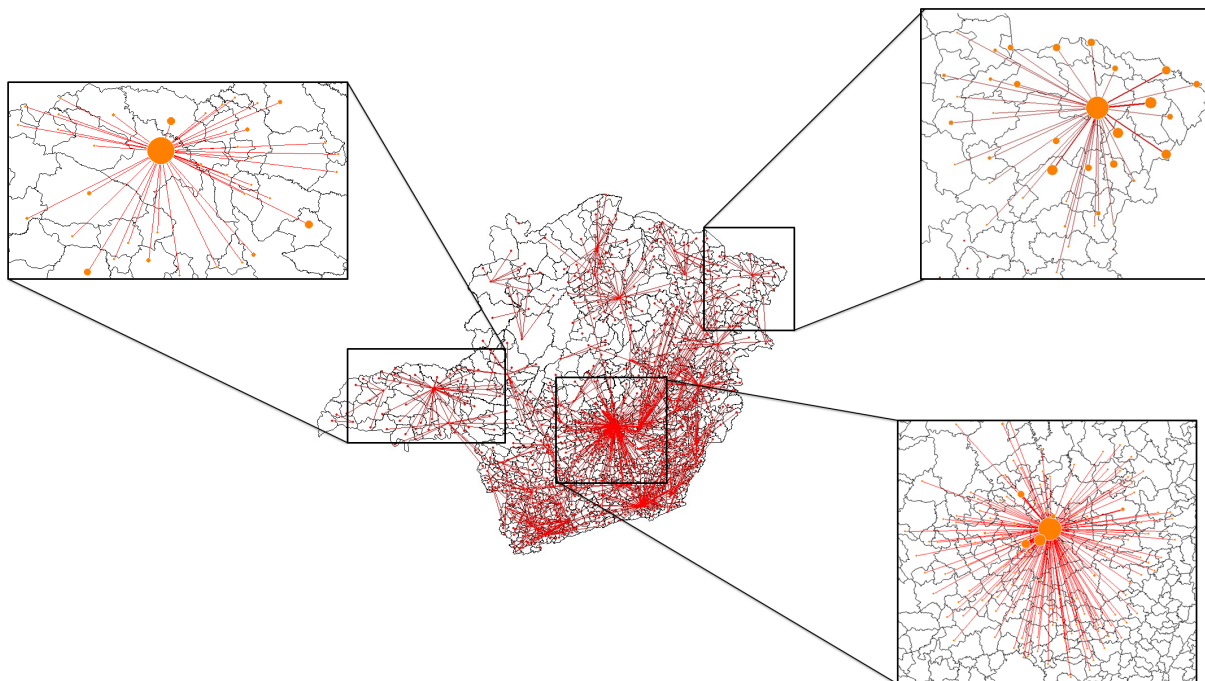
sendo a parcela não atendida deste grupo referente à demanda do município de Formoso.

Tabela 4.8: Representatividade das demandas de especialidade médica por faixas de atendimento.

Demanda Atendida	Até 0%	1% a 25%	26% a 50%	51% a 75%	76% a 100%
Número de Municípios	1	0	0	35	817
% Total Atendido	0%	0.000%	0.000%	0.875%	99.168%
% Total Real	0.043%	0.000%	0.000%	1.397%	98.575%

A quantidade da demanda atendida, a ociosidade da oferta, e as horas adicionais de especialidade médica encontram-se respectivamente nas Figuras 4.6a-4.6c. Pelos gráficos, observa-se que o modelo integrado atendeu consideravelmente todas as especialidades, ex-

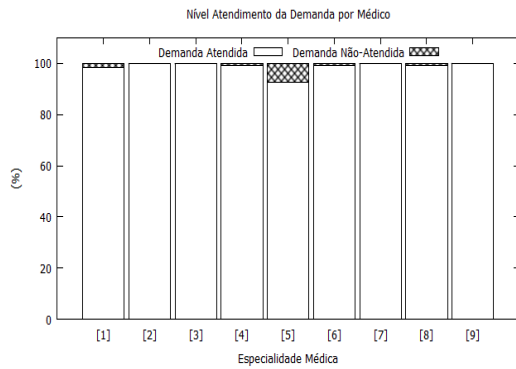
Figura 4.5: Deslocamento de pacientes para atendimento médico em MG com destaque para as regiões nordeste, central e triângulo mineiro.



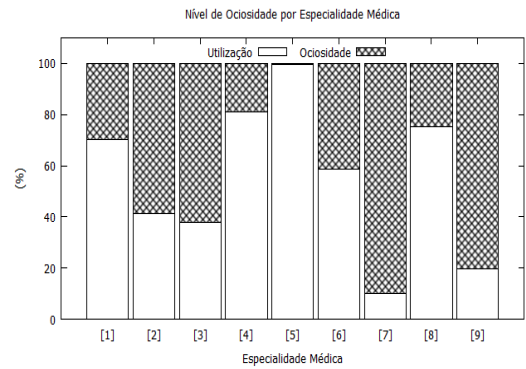
ceto mastologia que obteve uma demanda não atendida de aproximadamente 8%, mesmo sendo a especialidade de maior contratação adicional. Percebe-se também melhor aproveitamento da oferta de médicos desta especialidade, conforme apresenta a Figura 4.6b, concluindo-se que existe baixa disponibilidade de horas, dada a demanda total. O contrário também ocorre, como a elevada disponibilidade de horas de oftalmologia para a demanda existente, o que justifica a alta ociosidade dessa especialidade. A Figura 4.4b exibe a quantidade de horas disponíveis de médico por especialidade. A relação de horas disponíveis de médicos pela demanda total, apresentada na Figura 4.6d mostra que exceto em mastologia, todas as especialidades médicas possuem oferta excedente. Para mastologia, a quantidade de horas disponíveis não é capaz de atender toda a demanda, sendo necessária a contratação de aproximadamente 60% de médicos.

Com a oferta disponível para cada região de saúde, a contratação adicional de horas de especialidades médicas também ocorre para cada região. A Tabela 4.9 apresenta a quantidade de horas necessárias para suprir o atendimento da demanda dos CEMs. De 77 regiões de saúde, 55 necessitam de horas complementares em pelo menos uma especialidade, exceto oftalmologia. A quantidade de horas adicionais por região de saúde estão representadas no mapa da Figura 4.7 para pediatria. As cores mais intensas representam as regiões com maior deficiência de oferta, que concentram-se no norte e nordeste do estado. Considerando a distribuição desigual de médicos pelo estado, uma das soluções seria a contratação de mão-de-obra ou a redistribuição de médicos entre as regiões mais deficientes. Para pediatria, é necessária a contratação de 38 médicos na região de saúde de Januária, a mais deficiente.

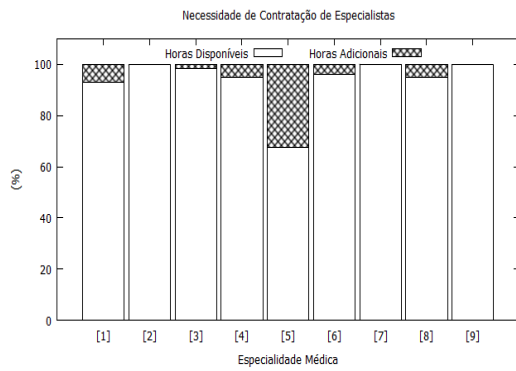
O atendimento da demanda por exame concentra-se nos municípios de Montes Claros, Belo Horizonte e Ipatinga, conforme apresenta a Tabela 4.10. Estes municípios detêm parcela significativa da capacidade disponível de equipamentos, como mostra a Figura



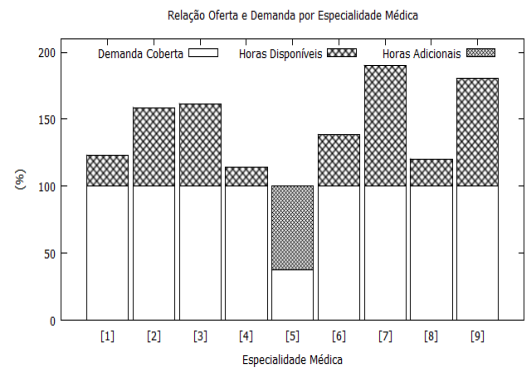
(a) Percentual de demanda atendida por especialidade médica.



(b) Percentual de ociosidade em relação às horas disponíveis.



(c) Percentual de horas adicionais pelas horas disponíveis.



(d) Percentual da demanda total, as horas disponíveis após cobertura e horas adicionais para complemento da demanda.

Figura 4.6: Análises dos resultados de especialidades médicas: [1]: Angiologia, [2]: Cardiologia, [3]: Endocrinologia, [4]: Ginecologia, [5]: Mastologia, [6]: Nefrologia, [7]: Oftalmologia, [8]: Pediatria, [9]: Urologia.

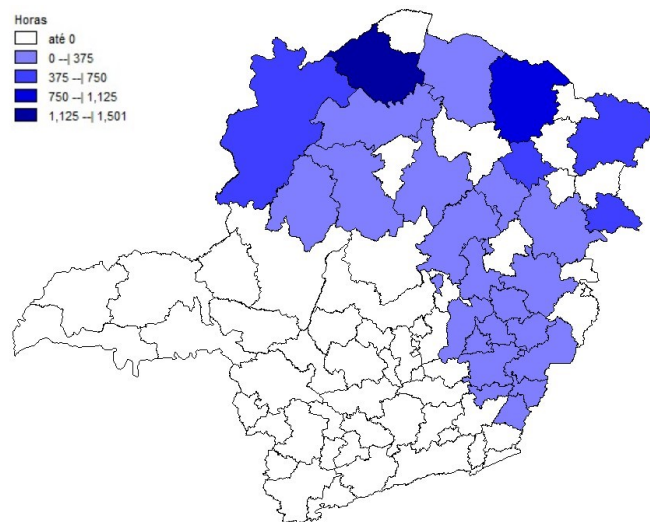


Figura 4.7: Horas adicionais necessárias para contratação de pediatras por região de saúde, quanto mais intensa a cor azul maior a necessidade de médicos.

Tabela 4.9: Horas adicionais necessárias para contratação em especialidade médica: [1]: Angiologia, [2]: Cardiologia, [3]: Endocrinologia, [4]: Ginecologia, [5]: Mastologia, [6]: Nefrologia, [7]: Oftalmologia, [8]: Pediatria, [9]: Urologia, [T]: Total.

CIR	Especialidade Médica (horas/semana)								
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[8]	[9]	[T]
A. Paraíba					18.5				18.5
Alfenas					30				30
Almenara			74.5	59.5	8.5	207.5	497.5		1038.5
Araçuaí	28.5		4.5	582	42.5	64	709.5		1431
Barbacena					15				15
B.Despacho					14				14
Brasília MG	40.5		0.5	156	20	7	321.5	3.5	549
Carangola	5.5			1	30	2	41.5		80
Caratinga				24	76.5	49	68		217.5
Cons.Lafaiete					40.5				40.5
Cel.Fabriciano	17.5			497.5		4	11.5		530.5
Curvelo	1				1.5	0.5			3
Diamantina	114.5		29.5	364	146.5	115	350.5		1120
Formiga					38				38
Frutal					24				24
Gov.Val.	57			80.5	445.5	16.5	335		934.5
Guanhães	20.5		10	16	17.5	31	129		224
Guaxupé	10				17	6.5			33.5
Ipatinga	49			586	80.5	1	13		729.5
Itabira	1			1	80.5		11		93.5
Itajubá					31				31
Itaúna					37				37
Ituiutaba					70				70
Janaúba	13.5			11.5	12.5	7.5	130.5		175.5
Januária	182.5	169.5	51.5	1399	172.5	237.5	1500.5	38	3751
J.Monlevade	1			5	25	4	3.5		38.5
J.Pinheiro	0.5			24	4		78.5		107
J.Forá					396				396
Manhuaçu	5			6.5	2.5		7		21
M.Novas	63		9.5	155.5	14	39	250.5		531.5
M.Claros	33.5			256	237	1.5	344.5		872.5
Muriaé	4.5			34.5	32.5		4.5		76
Nanuque	31.5		12.5	98	39	33	676	1	891
Ouro Preto					1				1
Pará de Minas					1.5				1.5
Passos					22.5				22.5
P.de Minas					2.5				2.5
Patrocínio					12.5				12.5
Pirapora	16.5			27.5	11	8.5	2.5		66
P.de Caldas	28				141.5	14			183.5
Ponte Nova	14			35	44.5	4.5	10		108
Pouso Alegre					46.5				46.5
Salinas	198		60.5	993	149	183	933.5		2517
S.Antón.Am.					2				2
S.João del Rei					54.5				54.5
S.S. do Paraíso	6				34.5				40.5
T.Oton				850.5	59	2.5	129.5		1041.5
Três Pontas					2.5				2.5
Ubá					27				27
Uberaba					1.5				1.5
Uberlândia					169.5				169.5
Unai	114		28	53.5	150.5	126	542.5		1014.5
Varginha					40.5				40.5
Vespasiano	1.5				11.5				13
Viçosa				10	80		9.5		99.5
Total	1249	169.5	281	6327	3285	1165	7111	42.5	19630

4.8a. A demanda total atendida em cada município é composta pelas demandas de cada equipamento, como exemplificado na Tabela 4.11 para o município de Belo Horizonte. A Figura 4.9 mostra o fluxo de atendimento dos pacientes e a Tabela A.2, apêndice A, representa o fluxo de atendimento dos municípios através da capital do estado, Belo Horizonte. Ao comparar os mapas de fluxos para a alocação da demanda em médico e exames, destaca-se maior atendimento em exames no norte e sul de MG com menor concentração na região central. Este resultado é reflexo do aumento de opções de locais para atendimento em exames, dada a disponibilidade de equipamentos em 183 municípios.

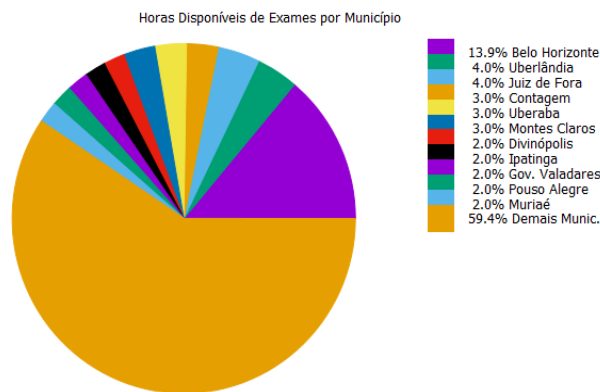
Com intuito de compreender o nível de atendimento da demanda de exames, os municípios foram agrupados por faixas de acordo com a quantidade da demanda atendida, conforme a Tabela 4.12, que apresenta também a representatividade dessa demanda pelo nível de cobertura e pelo total existente de 2.539.630 horas semanais. Esta tabela ressalta que alguns municípios foram atendidos parcialmente, sendo a maioria da população atendida entre 1% e 25% da demanda e apenas 6% da demanda total foi atendida em mais de 76%.

Tabela 4.10: Atendimento de exames em horas/semana por município.

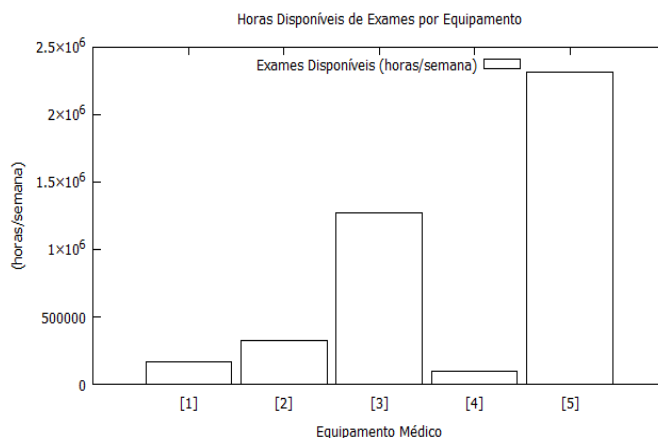
Município	Demanda Alocada (hs./sem.)	Município	Demanda Alocada (hs./sem.)	Município	Demanda Alocada (hs./sem.)
Montes Claros	54621	Andrelândia	3024	Ouro Preto	94
Belo Horizonte	47459	Arinos	3024	Monte Carmelo	92
Ipatinga	44337	Ataléia	3024	Inhapim	91
Contagem	30778	Angelândia	3023	Pedra Azul	91
Pouso Alegre	30199	Araújos	3022	Turmalina	88
Juiz de Fora	26275	Areado	3022	Guanhães	85
Teófilo Otoni	23428	Arceburgo	3021	Santos Dumont	83
Muriaé	23370	Aricanduva	3021	Elói Mendes	81
Governador Valadares	23218	Unaí	3019	Brumadinho	79
Jacutinga	22343	Abadia dos Dourados	3016	Andradas	78
Uberaba	20960	Alvarenga	3004	Lagoa da Prata	78
Alfenas	18205	Alvorada de Minas	2673	Arcos	77
Poços de Caldas	16624	Varginha	2570	Iturama	73
Barão de Cocais	16428	Barbacena	2436	Frutal	72
Mariana	14691	Januária	2326	Matozinhos	71
Santa Luzia	13842	Araporã	2313	Aimorés	68
Sabará	13765	Coronel Fabriciano	1990	Campos Gerais	67
Diamantina	12976	Lavras	1826	Carandá	67
Conselheiro Lafaiete	12493	Timóteo	1757	Caxambu	67
Manhuaçu	11936	Itajubá	1752	Borda da Mata	66
São João del Rei	11024	Pará de Minas	1681	Várzea da Palma	65
Araxá	10921	Nova Lima	1659	Sabinópolis	62
Ubá	10504	Itaúna	1641	Itaú de Minas	60
Araguari	9987	João Monlevade	1507	Conceição do Mato Dentro	59
Patos de Minas	9771	São Sebastião do Paraíso	1446	Itacarambi	56
Ibirité	9721	Bandeira	1434	Santa Rita do Sapucaí	56
Divinópolis	9473	Três Corações	1397	Rio Pomba	54
Cataguases	9252	João Pinheiro	1199	Prata	53
Uberlândia	8735	Lagoa Santa	1131	Lima Duarte	52
Bom Despacho	8153	Três Pontas	1067	Ipanema	50
Sete Lagoas	7897	Aiuruoca	994	Ibiá	49
Ituiutaba	7885	Leopoldina	988	Ouro Branco	48
Brasília de Minas	7716	Campo Belo	978	Paraopeba	48
Caratinga	7205	Congonhas	971	Bicas	47
Passos	6975	Guaxupé	948	Candeias	45
Nova Serrana	6925	Oliveira	891	Itapeçerica	45
Pitangui	6818	Machado	834	Mateus Leme	44
Divino	6758	São Lourenço	820	São Domingos do Prata	44
Baependi	6407	Visconde do Rio Branco	795	Mar de Espanha	43
Araçuaí	6312	Além Paraíba	635	Corinto	42
Patrocínio	6244	Piumhi	623	Poço Fundo	42
Formiga	6215	Extrema	597	Perdões	40
Alterosa	6046	Betim	492	Barroso	39
Abaeté	6038	São João Nepomuceno	474	Ipuiúna	34
Ribeirão das Neves	5986	Santo Antônio do Monte	463	Manga	34
Curvelo	5723	Manhumirim	373	Ouro Fino	34
Itabira	5327	Ervália	314	Alto Jequitibá	34
Janaúba	4951	Cruzília	304	Cláudio	33
Viçosa	4736	Capelinha	178	Itanhandu	33
Carangola	4388	Vespasiano	171	Tupaciguara	33
Taiobeiras	4187	Pedro Leopoldo	154	Campina Verde	32
Ponte Nova	3619	Salinas	152	Monte Azul	32
Pirapora	3600	Boa Esperança	139	Itapagipe	31
Vazante	3600	Itaobim	136	Juruáia	28
Sacramento	3124	Porteirinha	127	Brasilândia de Minas	27
Paracatu	3098	Rio Pardo de Minas	125	Carmópolis de Minas	27
Águas Formosas	3095	São Francisco	113	Lambari	27
Almenara	3085	Coração de Jesus	112	Paraisópolis	27
Alpinópolis	3081	Nanuque	106	Cabo Verde	24
Abre Campo	3024	Bambuí	100	Serra do Salitre	22
Alvinópolis	3024	Itabirito	98	Piranguçu	10
<b>Total</b>					<b>823041</b>

Tabela 4.11: Atendimento Exames por Equipamento em Belo Horizonte: [1]: Mamógrafo, [2]: Ressonância Magnética, [3]: Tomógrafo, [4]: Ultrassom Convencional, [5]: Ultrassom Doppler, [T]: Total.

Município	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[T]
Belo Horizonte	0	32121	12696	0	2642	47459



(a) Distribuição das 4.161.296 horas de exames por município.



(b) Disponibilidade de horas de exames por equipamento

Figura 4.8: Horas disponíveis de exames por município e equipamento: [1]: Mamógrafo, [2]: Ressonância Magnética, [3]: Tomógrafo, [4]: Ultrassom Convencional, [5]: Ultrassom Doppler.

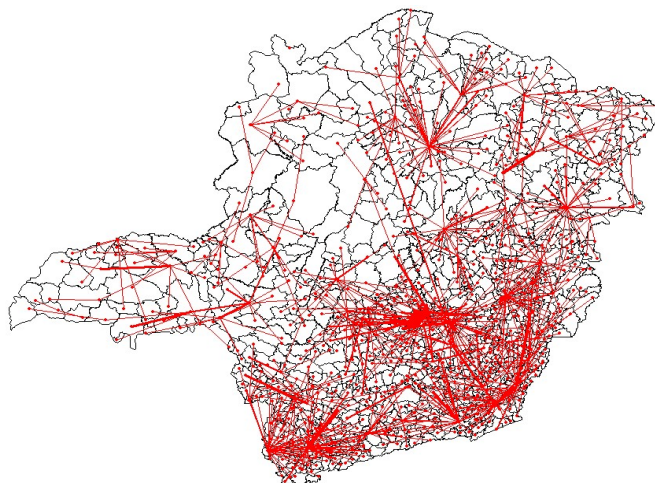
Fonte: DATASUS, (2010) [3].

Tabela 4.12: Representatividade das demandas de exames por faixas de atendimento.

Demanda Atendida	Até 0%	1% a 25%	26% a 50%	51% a 75%	76% a 100%
Número de Municípios	1	314	326	18	194
% Total Atendido	0	32%	45%	2%	21%
% Total Real	0.02%	58%	33%	3%	6%

O resultado final para o modelo de alocação de equipamento chama atenção pelo baixo atendimento da demanda por exames (Tabela 4.3), de aproximadamente 30% em praticamente todos os testes e de 32% para o cenário analisado (Tabela 4.4). Para compreender este resultado, realiza-se uma análise da quantidade de demanda atendida, a ociosidade da oferta e as horas adicionais para cada equipamento médico conforme mostram as Figuras 4.10a-4.10c. Pelos gráficos, observa-se que apesar do elevado atendimento para os

Figura 4.9: Deslocamento de pacientes para atendimento em exame em MG.

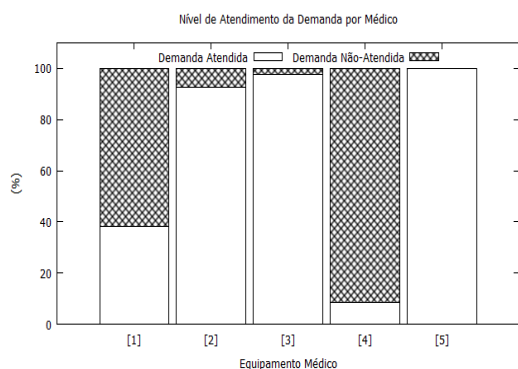


equipamentos ultrassom doppler, tomógrafo e ressonância, estes apresentam as maiores ociosidades. Esta contradição pode ser explicada pela relação entre demanda e oferta desses equipamentos, que possuem horas disponíveis acima do necessário para cobrir toda a demanda, enquanto os equipamentos mamógrafo e ultrassom convencional possuem horas disponíveis abaixo do necessário para atender toda a demanda, conforme apresentado na Figura 4.10d. A exigência por elevada contratação de exames extras principalmente para ultrassom convencional contribui para o baixo atendimento final de exames. Essas disparidades com excesso de horas disponíveis para algumas especialidades e equipamentos reforçam a presença de desigualdades na distribuição de médicos e equipamentos.

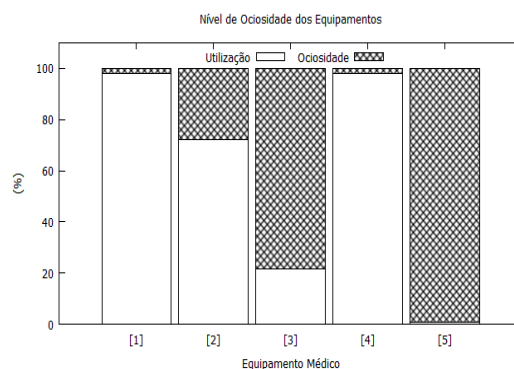
Em relação à alocação de equipamentos, a Tabela 4.13 apresenta a necessidade de exames adicionais, em horas por semana, de cada município. A quantidade de equipamentos disponíveis por equipamento é apresentada na Figura 4.8b. Os equipamentos mamógrafos, ressonâncias magnética e ultrassons convencional são deficientes em capacidade, sendo necessária a compra de 1 mamógrafo, 1 ressonância magnética e 14 ultrassons convencionais. A análise de necessidade de exames adicionais pode ser solucionada avaliando o melhor custo benefício, se a compra de exames a preço de mercado através de contratos com o setor privado, ou a compra de um novo equipamento. O município de Montes Claros necessita, por exemplo, de 30.103 horas de exames adicionais de ultrassom convencional. O equipamento de ultrassom convencional possui capacidade nominal de 3.024 exames por ano. Logo, para suprir os exames faltantes seriam necessários 10 novos equipamentos. Assim, os gestores devem avaliar a viabilidade de compra, manutenção e operação desses novos equipamentos em relação ao custo com a contratação por exames na rede privada. A compra de um novo equipamento é uma decisão de longo prazo, que atende às futuras demandas para os demais anos de vida útil da máquina. A análise de viabilidade deve considerar também o tempo de retorno do investimento de compra dos novos equipamentos, avaliando a quantidade de exames a serem realizados no mesmo.

Por fim, considerando um raio de cobertura de 200 km e  $IVS$  de 0.301, o modelo propõe a instalação de 80 CEMs para atender 99.1% da demanda em especialidade médica com mais de 90% de atendimento dos municípios mais vulneráveis. Para isso, seriam necessários a redistribuição de especialistas conforme os resultados do modelo e a contratação adicional de 32 angiologistas, 5 cardiologistas, 8 endocrinologistas, 159 ginecologistas, 83 mastologistas, 30 nefrologistas, 178 pediatras e 2 urologistas para os municípios indica-

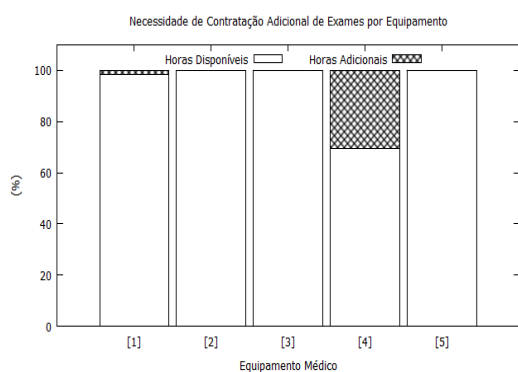




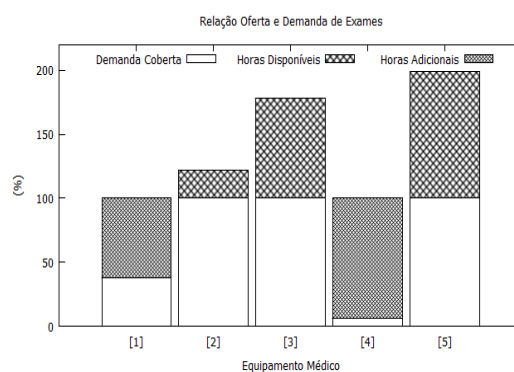
(a) Percentual de demanda atendida por equipamento.



(b) Percentual de ociosidade pela horas disponíveis utilizadas.



(c) Percentual de horas adicionais pelas horas disponíveis.



(d) Percentual da demanda total atendida, as horas disponíveis após cobertura e horas adicionais para complemento da demanda.

Figura 4.10: Análises dos resultados para exames médicos: [1]: Mamógrafo, [2]: Ressonância Magnética, [3]: Tomógrafo, [4]: Ultrassom Convencional, [5]: Ultrassom Doppler.

Tabela 4.13: Horas adicionais necessárias para atendimento em exames: [1]: Mamógrafo, [2]: Ressonância Magnética, [4]: Ultrassom Convencional, [T]

Município	Equipamento Médico (horas/semana)			
	[1]	[2]	[4]	[T]
Alfenas	42			42
Almenara			3085	3085
Araçuaí			147	147
Brasília de Minas	30			30
Conselheiro Lafaiete	159			159
Divinópolis		118		118
Governador Valadares	55			55
Ibirité	11			11
Ipatinga	2229			2229
Ituiutaba			7746	7746
Manhuaçu	43			43
Mariana	89			89
Montes Claros			30103	30103
Muriaé	24			24
Nova Serrana	8			8
Pouso Alegre	42	6		48
Sabará	94			94
Santa Luzia	79			79
Total	2905	124	41081	44110



dos. O que representa um aumento em relação ao disponível de 7.6% angiologistas, 0.25% cardiologistas, 1.7% de endocrinologistas, 5.1% de ginecologistas, 48.1% de mastologistas, 4.2% de nefrologistas, 5.4% de pediatras e 0.002% de urologistas. Em relação ao total disponível é necessário aumentar a contratação de médicos em 4.1%. Em atendimento de exames, a cobertura é de 32.4%, adquirindo-se 1 mamógrafo, 1 ressonância magnética e 14 ultrassons convencionais. O que representa um aumento de 1.5% de mamógrafos, 0.5% de ressonância magnética e 45% de ultrassom convencional. Ao todo, é necessário aumentar o número de equipamentos em 1.5%.

### 4.3 Ponderação entre atendimentos Médicos e de Equipamentos

Em algumas circunstâncias, o atendimento da demanda em especialidade médica pode possuir maior valor percebido do que o atendimento em exames, ou vice-versa. Assim, esta seção analisa o modelo integrado quando se atribui diferentes ponderações para as duas decisões analisadas: localização dos CEMs, denominada  $f_1$ , e alocação dos equipamentos, denominada  $f_2$ . Avalia-se o *trade-off* existente entre o atendimento em especialidade médica e de exames e no número de CEMs. Para isso, a função objetivo do modelo integrado foi adaptada conforme a formulação 4.1.

$$\text{Max } \alpha f_1 + (1 - \alpha) f_2 \quad (4.1)$$

$$f_1 = \left( \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{e \in E} DEM_{ie} x_{ije} - \sum_{m \in M} \sum_{e \in E} h_{me} \right) \quad (4.2)$$

$$f_2 = \left( \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{q \in Q} DEME_{iq} v_{ijq} - \sum_{j \in J} \sum_{q \in Q} w_{jq} \right) \quad (4.3)$$

sujeito a : (3.6) – (3.16) (3.22) (3.24) (3.26) (3.27) (3.28) (3.32) (3.36) – (3.46)

O peso atribuído a cada parte da função objetivo, conforme apresentado por (4.1) é representado pela letra grega alfa ( $\alpha$ ), um parâmetro de entrada com valor menor ou igual a um. Alfa igual a zero, maximiza apenas o atendimento por exames racionalizando as horas de exames adicionais, enquanto alfa igual a um maximiza o atendimento por médicos racionalizando as horas adicionais de especialistas. Os testes com os valores de alfa foram realizados para 116 CEMs, valor referente ao número total de municípios candidatos e alto valor para número de equipamentos disponíveis para compra,  $IVS$  de 0.301, e 200 km de  $D_{max}$ . O teste 1 adota alfa igual a zero acrescido em 0.1 até o teste 11, em que o valor de alfa é igual a 1, conforme apresentado na Tabela 4.14. A Tabela 4.14 fornece também os resultados obtidos para a função objetivo, com valores separados de  $f_1$  e  $f_2$ , o atendimento e horas adicionais de médicos e exames e a quantidade de CEMs.

Os resultados da função objetivo para cada valor de alfa mostra que o aumento da priorização do atendimento por exame em detrimento ao atendimento médico, ou seja,

Tabela 4.14: Resultado análise ponderação.

Teste	$\alpha$	1- $\alpha$	Valor Função Objetivo (hs./sem.)	$f_1$ (hs./sem.)	$f_2$ (hs./sem.)	Espec. Médica Atend. (%)	Médica Adicional (hs./sem.)	Exames Atend. (%)	Adicional (hs./sem.)	Qtd. CEMs
1	0	1	778934	234804	778934	99.95%	58349	36.47%	147172	115
2	0.1	0.9	728134	270984	778929	98.80%	18804	31.59%	23332	76
3	0.2	0.8	677320	270945	778914	98.97%	19336	32.79%	53848	75
4	0.3	0.7	626549	270977	778938	98.95%	19253	31.00%	8430	73
5	0.4	0.6	575752	270985	778931	98.63%	18305	33.01%	59495	79
6	0.5	0.5	524940	270970	778911	98.89%	19056	32.80%	54052	82
7	0.6	0.4	474160	270982	778928	98.96%	19257	31.30%	15950	77
8	0.7	0.3	423369	270984	778935	99.05%	19512	31.86%	30257	73
9	0.8	0.2	372565	270971	778945	98.76%	18689	31.49%	20723	75
10	0.9	0.1	321776	270983	778913	98.72%	18572	33.02%	59722	75
11	1	0	270985	270985	0	98.43%	17700	0.00%	0	82

diminuição de alfa, favorece o valor final da função objetivo assim como os valores individuais de cobertura, apresentados na Tabela 4.14. Para ser atendida em exame, uma demanda precisa primeiramente ser atendida em uma especialidade médica relacionada. Ao priorizar na função objetivo o atendimento em exame, todo o esforço alocado para esse atendimento é convertido também para atendimento em especialidade, por isso, o maior atendimento final para alfa igual a zero. O maior atendimento da demanda por médicos e exames com a diminuição de alfa requer maior contratação adicional de médicos, exames e número de CEMs. Este resultado reforça o *trade-off* existente entre atendimento e necessidade de recursos. Quanto maior a cobertura final dos pacientes, maior os custos com instalação, manutenção e operação dos CEMs e dos equipamentos para atingir esta cobertura.

O valor de alfa igual a zero exige também um maior número de CEMs, consequência do maior atendimento total. Para os demais valores de alfa, o número de CEMs varia entre 73 e 82. Em alguns casos, como por exemplo de alfa igual a 0.1 para 0.4, a necessidade por CEMs é maior mesmo com um atendimento menor em médico, porém maior em exames. Enfatizando a relação de dependência entre as decisões quanto ao NC.

A adoção do cenário que possui maior cobertura, ou seja, alfa igual a zero, implica em um aumento de 125% no número de CEMs em relação ao orçamento inicial, com um aumento de apenas 1.3% do atendimento da demanda em médico e de 14% em exames. Em relação às horas disponíveis, adotar este cenário, significa aumentar o quadro atual de médicos em 12% e 3.5% de novos equipamentos. Ao comparar esta opção de configuração de planejamento de localização e alocação com aquela obtida para o atendimento máximo sem ponderação (seção 4.2), obtém-se um aumento no número de CEMs de 43.7%, a medida que a cobertura de atendimento médico cresce menos que 1% com um aumento significativo de contratação de médicos de 197.2%. Em termos de exames, aumenta-se a cobertura em 12.5% acompanhados da necessidade de acréscimo de exames em 233.6%.

Em um cenário de crise econômica, as técnicas de auxílio à tomada de decisão buscam a racionalização de gastos. Logo, após a comparação entre os dois melhores atendimentos em cobertura, uma opção seria adotar os resultados obtidos de localização e alocação da seção 4.2, uma vez que o pequeno ganho em termos de cobertura da demanda para o melhor resultado da análise ponderada não justifica as diferenças no aumento de gastos adicionais com a contratação de médicos e aquisição de exames. Uma outra opção de decisão seria adotar os resultados obtidos para alfa igual a 0.7, em que os atendimentos das demandas são próximos aos resultado da seção 4.2, em torno de 99% para médico e 32%

para exames. Porém neste caso, o número de CEMs reduz de 80 para 73, acompanhados por uma redução da necessidade de contratação adicional em 118 horas de especialistas e de 13853 horas de exames. Assim, a decisão final mais atraente para o estado de MG é adotar a definição dos municípios obtido para alfa igual a 0.7. As Figuras 4.11a e 4.11b apresentam os municípios escolhidos para instalação dos CEMs para decisão da seção 4.2 e para alfa 0.7, respectivamente.

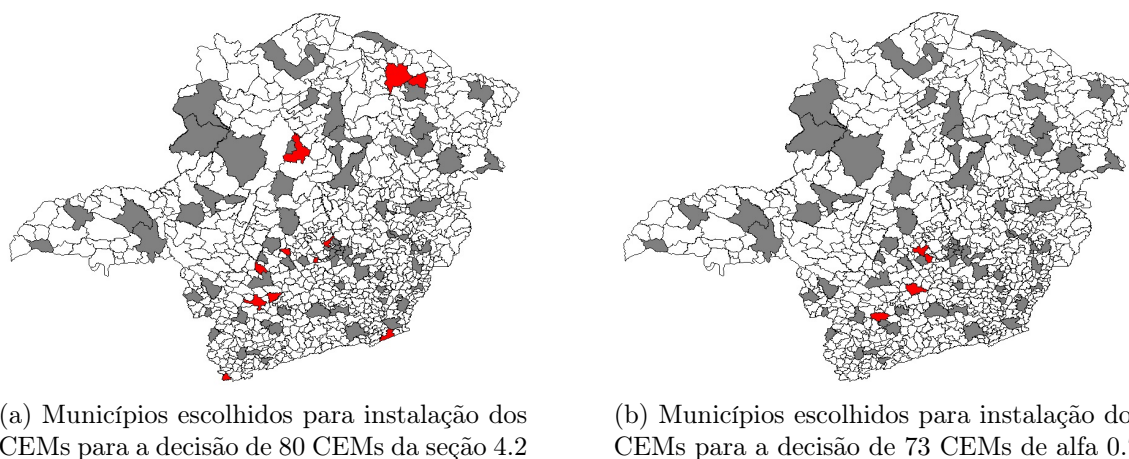


Figura 4.11: Municípios escolhidos para instalação dos CEMs, em cinza os municípios semelhantes e em vermelho os municípios diferentes nas duas decisões.

Ao comparar as escolhas dos municípios das decisão da seção 4.2 de instalar 80 CEMs e de alfa 0.7 de instalar 73 CEMs, tem-se a exclusão no primeiro de onze municípios destacados em vermelho na Figura 4.11a: Além Paraíba, Arcos, Boa Esperança, Campo Belo, Extrema, Igarapé, Nova Serrana, Pedro Leopoldo, Rio Pardo de Minas, Taiobeiras e Várzea da Palma. A lista completa dos municípios encontra-se na Tabela 4.5. Para a decisão de 73 CEMs, o modelo opta pela seleção de quatro municípios diferentes: Taiobeiras, Mateus Leme, Para de Minas e Oliveira, conforme apresentado em vermelho na Figura 4.11b.

A análise dos resultados adotando-se ponderações às diferentes decisões da função objetivo mostra que priorizar o atendimento de exames pode levar a resultados melhores quanto a cobertura dos pacientes. Porém, para que isso ocorra é necessário aumentar o número de contratação de médicos e exames adicionais, bem como o número de CEMs a serem instalados. Essa análise, fornece diferentes opções para a tomada de decisão na aplicação real de acordo com os objetivos priorizados pelo decisor.

# Capítulo 5

## Conclusões

Este trabalho abordou o problema simultâneo de localização de facilidades e alocação de recursos na saúde pública do estado de MG. O objetivo da pesquisa é de definir a instalação de CEMs e a alocação de equipamentos médicos de forma a atender a demanda da população racionalizando a necessidade de utilização de recursos adicionais. A relação de interdependência entre ambas as decisões, impõe ao problema um grande desafio, que estimula a investigação de uma abordagem integrada para a resolução desse tipo de problema.

Assim, foi proposto o desenvolvimento de modelos integrado e não integrados, baseados na Programação Linear Inteira Mista, para em conjunto definir os locais ótimos para a instalação dos CEMs e de alocação dos equipamentos no estado de MG. Para isso, são desenvolvidos três modelos. O primeiro com objetivo de localizar os CEMs de forma a maximizar a demanda por especialidade médica e a utilização da oferta disponível de especialistas. O segundo modelo, a partir dos resultados obtidos no primeiro, tem como objetivo alocar novos equipamentos de forma a maximizar o atendimento da demanda por exames médicos racionalizando a aquisição de novos equipamentos. A compra de equipamentos depende da localização dos CEMs obtida no primeiro modelo e do atendimento a priori na especialidade médica relacionada ao equipamento. O terceiro modelo, propõe uma abordagem integrada com decisões simultâneas para o problema. Os resultados da formulação integrada é então comparada à não integrada através de um exemplo numérico fictício.

A comparação das abordagens baseou-se em um conjunto de 32 instâncias teste. Os resultados obtidos nos experimentos mostraram que a abordagem integrada atinge maior atendimento da demanda final além de otimizar a utilização de recursos, dada a menor ociosidade obtida para os recursos disponíveis. Devido a relação de dependência das decisões, a formulação integrada consegue otimizar a seleção dos municípios para instalação de um CEM observando a disponibilidade de equipamentos e médicos, aumentando assim a cobertura final. Assim, o modelo integrado foi aplicado ao problema real de MG considerando os melhores resultados desse modelo.

A primeira análise dos experimentos aplicados ao contexto real refere-se aos resultados obtidos pela combinação da quantidade de CEMs a serem instalados (15, 45 e 60), considerando 3 raios de abrangência (80, 150 e 300 km), dois valores para *IVS* (0.301 e 0.501) e duas configurações de número de equipamentos disponíveis para compra, um simulando cenário de escassez e outro de maior liberdade de compra.

Os modelos consideram as características demográficas para seleção de municípios candidatos a receberem um CEM. Dos 853 municípios, 116 possuem as características de população mínima de 30 mil habitantes e produção aferida em no mínimo 3 especialidades médicas. Além disso, os municípios são divididos em subconjuntos com aqueles considerados mais vulneráveis socialmente e menos vulneráveis, inserindo a questão de equidade de acesso à saúde. Para a divisão dos grupos foi escolhido o Indicador de Vulnerabilidade Social. O *IVS*, representa um bom indicador ao considerar fatores sociais em detrimento as avaliações econômicas de cada município, sendo muito utilizado na análise de políticas públicas. O resultado da inclusão da restrição de equidade social, assegura uma cobertura mínima de 90% do grupo considerado mais vulnerável socialmente, levando a instalação de CEMs para as regiões como norte e nordeste do estado, que registram maior parte da demanda dos municípios vulneráveis.

Os experimentos demonstraram maiores diferenças nos resultados quando submetidos à diferentes distância máxima de deslocamento do paciente. A meta inicial do governo de MG, é que um paciente desloque no máximo 80 km para receber um atendimento. Entretanto, com o orçamento disponível, para alcançar essa meta é necessário reduzir o número mínimo de habitantes no critério de classificação dos municípios candidatos, aumentando em 178% o número de CEMs a serem instalados.

Os resultados dos experimentos permitem concluir também que o aumento no número de CEMs a partir de determinado valor não significa ganho em atendimento na mesma proporção. Assim como, um aumento no número de equipamentos resulta em ganho pouco expressivo de cobertura de exames, pois a necessidade de exames adicionais significa desvantagem em termos de aproveitamento da capacidade existente, indicando que para os dados reais analisados não basta aumentar o número de equipamentos, é necessário uma melhor distribuição dos tipos de equipamentos disponíveis considerando a relação de demanda e oferta. Em relação aos diferentes valores de *IVS*, observa-se pequena alteração no valor da função objetivo e leve redução do atendimento médico ao aumentar o *IVS*. Assim, mesmo restringindo-se o grupo dos municípios vulneráveis o atendimento desse grupo é alcançado em no mínimo 90%. Em relação às horas adicionais de médicos e exames, conclui-se que seguem o mesmo movimento de crescimento e decréscimo do atendimento de médicos e exames.

A segunda análise do trabalho foi quantificar o número mínimo de CEMs e de equipamentos que resulta em uma cobertura máxima tanto por especialidade médica quanto por equipamento. Para isso, os modelos foram submetidos a um número máximo de CEMs e de equipamentos disponíveis para instalação. Adotou-se um raio de cobertura acordado juntamente com a equipe do projeto, de 200 km e *IVS* de 0.301 [50]. Como resultado, os municípios escolhidos para receber um CEM encontram-se bem distribuídos geograficamente, sendo necessário instalar aproximadamente 56.8% de CEMs a mais em relação ao orçamento disponível, de 51 CEMs, com acréscimo de 1.5% de equipamentos para um ganho de 0.5% no atendimento médico e de 1.3% de exames. Essa análise tem como intuito verificar o número de CEMs e equipamentos que proporcionam atendimento máximo racionalizando os recursos. Porém, deve-se verificar o custo benefício dessa decisão dado o aumento de custos envolvidos e de ganho real em atendimento.

A última análise consiste em avaliar o modelo integrado quanto a diferentes níveis de cobertura ao adotar pesos para as decisões do problema. Essa análise tem como intuito auxiliar os decisores considerando a priorização de determinada decisão, como por exemplo de localização dos CEMs, em detrimento a decisão de alocação de equipamentos.

O resultado revelou que a priorização da maximização de equipamentos possui maior atendimento, devido a relação de dependência com a demanda por especialidade médica existente no problema. Além disso, ao considerar alfa igual a 0.7, obtém-se o melhor resultado em termos de cobertura e de racionalização no número de CEMs e de horas adicionais necessárias para atendimento da demanda. Este resultado apresenta como a opção mais viável para o governo de MG ao obter maior cobertura e racionalização de recursos.

Conclui-se que a utilização da abordagem integrada, representa oportunidade de evolução na pesquisa operacional, visto que esse tipo de problema é geralmente realizado de forma separada. As decisões realizadas de forma conjunta conseguem conectar as dependências existentes e avaliar de maneira mais realista as necessidades do problema. O desenvolvimento do método proposto no trabalho pode contribuir para demais problemas na otimização, com objetivo de localizar facilidades e alocar recursos, priorizando a racionalização das capacidades existentes. Além disso, esse tipo de trabalho contribui para o planejamento de operações de políticas públicas, principalmente na saúde, setor que sofre com as desigualdades de acesso, recursos escassos, e falta de planejamento.

A pesquisa desenvolvida apresenta limitações relativas à coleta de dados visto que o sistema de informação do SUS pode conter omissões ou valores incorretos. A outra limitação refere-se a aplicação da pesquisa, restrita ao estado de Minas Gerais, contendo no modelo formulações aplicadas às características sociais, demográficas e geográficas desse estado. Assim, para a replicação em demais locais o modelo deve ser adaptado conforme as características demográficas, políticas e sociais. Demais limitações estão relacionadas aos recursos disponíveis, de número de CEMs a serem instalados, de médicos e equipamentos. O trabalho sugere, por exemplo, a instalação de 80 CEMs pelo modelo integrado, muito acima do disponível (51). Além disso, a decisão de horas adicionais sugerida para especialidades médicas estão condicionadas a forma que o estado pretende solucionar esse problema, se através do redistribuição dos profissionais de saúde ou através de contratação de novos.

Pesquisas futuras do trabalho podem ser realizadas no âmbito de minimizar as limitações impostas através de aplicações em outros estados, em outros cenários de demanda e capacidade. Assim como, através de modelos considerando ocupação no sistema de saúde, analisando tempo médio de atendimento médico e de realização de exames. O estudo adotou estimativas conservadoras para a demanda, porém o parâmetro de demanda pode ser maior, necessitando maior investigação. Além disso, o trabalho adotou uma simplificação com a relação de um exame por atendimento. Em trabalhos futuros, pode-se investigar a realização de exames em diversos equipamentos a partir de um atendimento médico. Outros ajustes podem ser realizados com adoção de mais de um raio de cobertura para atendimento dos paciente, ou através de raios definidos de acordo com as condições de saúde do pacientes ou pelas condições sociais do mesmo. Pode-se ainda adotar níveis de serviço a cada CEM, através de restrições de atendimento mínimo e máximo. A decisão de compra de exames no mercado privado versus a decisão de aquisição de um novo equipamento, pode ser tratada em trabalhos futuros com minimização de custos para avaliação da melhor alternativa.

O problema de localização de facilidades simultâneo a alocação de equipamentos, possui diversas formas de aplicações nos mais variados contextos da saúde. O trabalho apresentado refere-se a uma amostra de aplicação do problema e de como a pesquisa

---

operacional pode auxiliar no processo decisório através da utilização eficaz dos recursos públicos, influenciando para melhores condições de vida da população.

# Referências Bibliográficas

- [1] Saúde: Pimentel vai criar 77 centros de especialidades e carreira de médico da família. Disponível em: <http://www.ptmg.org.br/saude-pimentel-vai-criar-77-centros-de-especialidades-e-carreira-de-medico-da-familia>. Acessado em: 2017-07-16.
- [2] O sistema Único de saúde, ses-mg. Disponível em: <http://www.saude.mg.gov.br/sus>. Acessado em: 2017-11-18.
- [3] Datasus, portal da saúde, ministério da saúde. Disponível em: <http://www2.datasus.gov.br/DATASUS/index.php?area=0201>. Acessado em: 2017-02-20.
- [4] Distância entre municípios - google mapas. Disponível em: <http://www.mapas.google.com>. Acessado em: 2017-02-15.
- [5] Indicadores instituto brasileiro de geografia e estatística, ibge. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br> Acessado em: 2017-02-10.
- [6] Índice de vulnerabilidade social, ivs, instituto de pesquisa econômica aplicada. Disponível em: <http://ivs.ipea.gov.br/ivs>. Acessado em: 2017-02-10.
- [7] R. Aboolian, O. Berman, e V. Verter. Maximal accessibility network design in the public sector. *Transportation Science*, 50(1):336–347, 2015.
- [8] A. Ahmadi-Javid, P. Seyedi, e S. S. Syam. A survey of healthcare facility location. *Computers & Operations Research*, 2016.
- [9] J. N. Ares, H. De Vries, e D. Huisman. A column generation approach for locating roadside clinics in africa based on effectiveness and equity. *European Journal of Operational Research*, 254(3):1002–1016, 2016.
- [10] C. R. Azzoni. *Teoria da localização: uma análise crítica: a experiência de empresas instaladas no estado de São Paulo*. Número 19. Instituto de Pesquisas Econômicas, 1982.
- [11] M. Barbati e C. Piccolo. Equality measures properties for location problems. *Optimization Letters*, 10(5):903–920, 2016.
- [12] R. Batta, M. Lejeune, e S. Prasad. Public facility location using dispersion, population, and equity criteria. *European Journal of Operational Research*, 234(3):819–829, 2014.
- [13] M. J. Beckmann. Location theory. Technical report, 1968.



- [14] B. P. Berg. Location models in healthcare. Em *Handbook of Healthcare Operations Management*, páginas 387–402. Springer, 2013.
- [15] D. J. Bowersox. Logística empresarial: o processo de integração da cadeia de suprimento/donald j. *Bowersox, David J. Closs*, 2001.
- [16] C. C. Branas, E. J. MacKenzie, e C. S. ReVelle. A trauma resource allocation model for ambulances and hospitals. *Health Services Research*, 35(2):489, 2000.
- [17] C. BRASIL. Conselho nacional de secretários de saúde. *A Gestão do SUS / Para entender a gestão do SUS/ Conselho Nacional de Secretários de Saúde, Brasília*, 1, 2015.
- [18] L. Brotcorne, G. Laporte, e F. Semet. Ambulance location and relocation models. *European journal of operational research*, 147(3):451–463, 2003.
- [19] T. Cardoso, M. D. Oliveira, A. Barbosa-Póvoa, e S. Nickel. An integrated approach for planning a long-term care network with uncertainty, strategic policy and equity considerations. *European Journal of Operational Research*, 247(1):321–334, 2015.
- [20] Y. M. Carson e R. Batta. Locating an ambulance on the amherst campus of the state university of new york at buffalo. *Interfaces*, 20(5):43–49, 1990.
- [21] Y. Chan, W. B. Carter, e M. D. Burnes. A multiple-depot, multiple-vehicle, location-routing problem with stochastically processed demands. *Computers & Operations Research*, 28(8):803–826, 2001.
- [22] S.-H. Cho, H. Jang, T. Lee, e J. Turner. Simultaneous location of trauma centers and helicopters for emergency medical service planning. *Operations Research*, 62(4):751–771, 2014.
- [23] R. Church e C. ReVelle. The maximal covering location problem. Em *Papers of the Regional Science Association*, volume 32, páginas 101–118. Springer, 1974.
- [24] M. A. Costa e B. O. E. Marguti. Atlas da vulnerabilidade social nos municípios brasileiros. *Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea)*, 2015.
- [25] M. Daskin. Network and discrete location: models, algorithms and applications. *Journal of the Operational Research Society*, 48(7):763–764, 1997.
- [26] M. Daskin e L. Dean. Handbook of or/ms in health care: A handbook of methods and applications. 2004.
- [27] M. S. Daskin. A maximum expected covering location model: formulation, properties and heuristic solution. *Transportation science*, 17(1):48–70, 1983.
- [28] M. S. Daskin. What you should know about location modeling. *Naval Research Logistics (NRL)*, 55(4):283–294, 2008.
- [29] E. M. Delmelle, J.-C. Thill, D. Peeters, e I. Thomas. A multi-period capacitated school location problem with modular equipment and closest assignment considerations. *Journal of Geographical Systems*, 16(3):263–286, 2014.

- [30] D. J. Eaton, M. S. Daskin, D. Simmons, B. Bulloch, e G. Jansma. Determining emergency medical service vehicle deployment in austin, texas. *Interfaces*, 15(1): 96–108, 1985.
- [31] A. Fo e I. da Silva Mota. Optimization models in the location of healthcare facilities: a real case in brazil. *Journal of Applied Operational Research*, 4(1):37–50, 2012.
- [32] A. M. Geoffrion e R. F. Powers. Twenty years of strategic distribution system design: An evolutionary perspective. *Interfaces*, 25(5):105–127, 1995.
- [33] S. L. Hakimi. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations research*, 12(3):450–459, 1964.
- [34] S. L. Hakimi. Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems. *Operations Research*, 13(3):462–475, 1965.
- [35] M. Karatas, N. Razi, e H. Tozan. A comparison of p-median and maximal coverage location models with q-coverage requirement. *Procedia Engineering*, 149:169–176, 2016.
- [36] J. Lim, E. Claypool, B. A. Norman, e J. Rajgopal. Coverage models to determine outreach vaccination center locations in low and middle income countries. *Operations Research for Health Care*, 9:40–48, 2016.
- [37] B. G. López-Valcárcel, P. B. Pérez, e R. S. Vega. Oferta, demanda e necessidade de médicos especialistas no brasil. projeções para 2020. *Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*, 2011.
- [38] J. Luo, L. Tian, L. Luo, H. Yi, e F. Wang. Two-step optimization for spatial accessibility improvement: A case study of health care planning in rural china. *BioMed research international*, 2017, 2017.
- [39] H.-Y. Mak, Y. Rong, e Z.-J. M. Shen. Infrastructure planning for electric vehicles with battery swapping. *Management Science*, 59(7):1557–1575, 2013.
- [40] H.-Y. Mak, Z.-J. M. Shen, et al. Integrated modeling for location analysis. *Foundations and Trends® in Technology, Information and Operations Management*, 9(1–2): 1–152, 2016.
- [41] I. Malachias, F. A. G. Leles, e M. A. S. Pinto. Plano diretor de regionalização da saúde de minas gerais. *Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais*, 2010.
- [42] A. M. Mestre, M. D. Oliveira, e A. P. Barbosa-Póvoa. Location–allocation approaches for hospital network planning under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 240(3):791–806, 2015.
- [43] G. d. M. Ministério da Saúde. Portaria n° 1.631, de 1° de outubro de 2015. Disponível em:<http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2015>. Acessado em: 2017-03-03.
- [44] A. Novaes e C. Rosseto. Localização de depósitos numa rede logística com o auxílio de gis. Em *Anais do VII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, São Paulo*, volume 1, páginas 605–617, 1993.

- [45] W. Ogryczak. Inequality measures and equitable locations. *Annals of Operations Research*, 167(1):61–86, 2009.
- [46] S. H. Owen e M. S. Daskin. Strategic facility location: A review. *European journal of operational research*, 111(3):423–447, 1998.
- [47] J. Paim, C. Travassos, C. Almeida, L. Bahia, e J. Macinko. The brazilian health system: history, advances, and challenges. *The Lancet*, 377(9779):1778–1797, 2011.
- [48] J. Paim, C. Travassos, C. Almeida, L. Bahia, e J. Macinko. Saúde no brasil 1 o sistema de saúde brasileiro: história, avanços e desafios. *Veja*, 6736(11):60054–8, 2012.
- [49] D. G. C. Pinto, M. A. C. Costa, e M. L. d. A. C. Marques. O índice de desenvolvimento humano municipal brasileiro. *Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea)*, 2013.
- [50] L. r. Pinto, S. V. Conceição, J. F. d. F. Almeida, e G. Miranda. Projeto de desenvolvimento de metodologias, instrumentos e análises para a gestão estadual do sus-mg. Technical report, Technical Report, 2016.
- [51] N. D. Pizzolato e H. B. F. Da Silva. The location of public schools: evaluation of practical experiences. *International Transactions in Operational Research*, 4(1):13–22, 1997.
- [52] W. Qi, Y. Liang, e Z.-J. M. Shen. Joint planning of energy storage and transmission for wind energy generation. *Operations Research*, 63(6):1280–1293, 2015.
- [53] S. U. Randhawa e T. M. West. An integrated approach to facility location problems. *Computers & Industrial Engineering*, 29(1-4):261–265, 1995.
- [54] C. ReVelle e K. Hogan. The maximum availability location problem. *Transportation Science*, 23(3):192–200, 1989.
- [55] V. P. R. Ribeiro, P. C. A. Remoaldo, J. Gutiérrez, e J. C. Ribeiro. Acessibilidade e sig no planeamento em saúde: uma abordagem baseada em modelos de alocação-localização. *Revista portuguesa de estudos regionais*, 38:3–18, 2015.
- [56] D. Schilling, D. J. Elzinga, J. Cohon, R. Church, e C. ReVelle. The team/fleet models for simultaneous facility and equipment siting. *Transportation Science*, 13(2):163–175, 1979.
- [57] S. R. Shariff, N. H. Moin, e M. Omar. Location allocation modeling for healthcare facility planning in malaysia. *Computers & Industrial Engineering*, 62(4):1000–1010, 2012.
- [58] Z. Shen. Integrated supply chain design models: a survey and future research directions. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 3(1):1, 2007.
- [59] J. L. d. C. Silva e O. M. d. Oliveira Filho. Método prático para resolução do problema de localização de facilidades capacitado. 2005.

- [60] M. R. SILVA. Uma contribuição ao problema de localização de terminais de consolidação no transporte de carga parcelada. *Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo*, 2004.
- [61] I. Sociais. Uma análise das condições de vida da população brasileira. *Rio de Janeiro*, 2013.
- [62] C. Toregas, R. Swain, C. ReVelle, e L. Bergman. The location of emergency service facilities. *Operations Research*, 19(6):1363–1373, 1971.
- [63] P. Van den Berg, G. Kommer, e B. Zuzáková. Linear formulation for the maximum expected coverage location model with fractional coverage. *Operations Research for Health Care*, 8:33–41, 2016.
- [64] V. Verter e S. D. Lapierre. Location of preventive health care facilities. *Annals of Operations Research*, 110(1-4):123–132, 2002.
- [65] F. Wang. Measurement, optimization, and impact of health care accessibility: a methodological review. *Annals of the Association of American Geographers*, 102(5): 1104–1112, 2012.
- [66] P. Wanke. Estratégia de posicionamento logístico: conceitos, implicações e análise da realidade brasileira. *Revista Tecnológica*, páginas 44–54, 2001.
- [67] H. R. Waters. Measuring equity in access to health care. *Social Science & Medicine*, 51(4):599–612, 2000.
- [68] A. WOLFFENBÜTTEL. O que é?-índice de gini. *IPEA-Instituto de Pesquisas Econômicas e Aplicadas; PNUD-Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. Desafios do Desenvolvimento. Edição*, 4(1), 2004.
- [69] P. Yin e L. Mu. Modular capacitated maximal covering location problem for the optimal siting of emergency vehicles. *Applied Geography*, 34:247–254, 2012.
- [70] H. P. Young. *Equity: in theory and practice*. Princeton University Press, 1995.

# Apêndice A

## Fluxo de Atendimento das Demandas em Belo Horizonte

Como uma exemplificação geral do fluxo de atendimento das demandas por médicos e exames, foi escolhido para a representação o fluxo do município de Belo Horizonte, a capital do estado, conforme apresentado pelas tabelas A.1 e A.2.

Tabela A.1: Atendimento em horas semanais da demanda por Médico em Belo Horizonte: [1]: Angiologia, [2]: Cardiologia, [3]: Endocrinologia, [4]: Ginecologia, [5]: Mastologia, [6]: Nefrologia, [7]: Oftalmologia, [8]: Pediatria, [9]: Urologia, [T]:Total

Origem	Destino	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[T]
Acaiaca		3	6	1			3	1	20	1	34
Alfredo Vasconcelos		4		2		4	6	2	33		50
Alto Rio Doce		7	16	4	59		10		59		154
Alvinópolis		9	20	5			13	5	77	3	131
Antônio Carlos		7	15		58		9	4	58		150
Antônio Dias		6	13	3		5	8		48		81
Araçá		2	3	1	12		2	1	12	1	32
Araújos		5	11	3	43		7	3	43	2	116
Baldim		5	11	3	40		7		40	2	106
Barão de Cocais		19	42	10	160	17	26	10	160	7	448
Barra Longa		4	8	2		3	5	2	30	1	55
Barroso		13	27		103		17		103	4	265
Bela Vista de Minas		6	14	3	51		8	3	51	2	138
Belo Horizonte		1508	3267	754	12567	1307	2011	754	12567	503	35236
Belo Vale		5	10	3			6	3	39	2	66
Betim		257	557	129	2140	223	343	129	2140	86	6000
Bom Jesus do Amparo		4	8	2			5	2	30	1	50
Bonfim		4	9	2			6	2	35	2	59
Brás Pires		3	6	2			4	2	23	1	40
Brumadinho		23	50	12	190		31	12	190	8	512
Cachoeira da Prata		2	5	1			3	1	19	1	31
Caetanópolis		7	15	4			9	4	57	3	98
Capela Nova		3	6	2				2	24		36
Capim Branco	Belo Horizonte	6	13	3			8	3	48	2	82
Caranaíba		2		1			3	1	17	1	24
Carandá		15			125			8	125		273
Carmésia		2	4	1		2	2	1	13	1	24
Carmo da Mata		7	15	4	57		9	4	57	3	155
Carmo do Cajuru		13	29	7	110		18	7	110	5	297
Carmópolis de Minas		12	25	6			15	6	95	4	161
Casa Grande		2		1				1	12		14
Catas Altas		3	7	2			4	2	27	1	45
Catas Altas da Noruega		2					3	1	18	1	25
Cipotânea		4				4			34		42
Cláudio		17	37	9			23	9	140	6	239
Conceição do Mato Dentro		11	23	6	89		15		89	4	235
Conceição do Pará		4	7	2			5	2	27	1	46
Confins		4	9	2	34		6	2	34	2	91
Congonhas		32	70		268				268	11	648
Contagem		392	849	196	3264	340	522	196	3264	131	9151
Cordisburgo		6	12	3	45		7	3	45	2	121
Coronel Xavier Chaves		2					3	1	17	1	23
Cristiano Ottoni		3		2			4		26		34
Crucilândia		3	7	2	25		4	2	25	1	68
Curvelo		48	103	24	396		64	24	396	16	1070
Desterro de Entre Rios		5	10	2			6	2	36	2	62
Desterro do Melo		2				2		1	15		20
Diogo de Vasconcelos		3	5	1			3	1	20	1	33
Dionísio		5	11	3			7	3	43	2	73
Dom Joaquim		3	6	2	23	3	4	2	23	1	64
Dom Silvério		3	7	2			5	2	27	1	45
Entre Rios de Minas		9	20	5			12	5	76	3	129

Origem	Destino	A	C	E	G	M	N	O	P	U	T
Esmeraldas		42	90	21	346		56	21	346	14	934
Felixlândia		9	20	5	76		12	5	76	3	204
Ferros		7	14	3	53		9		53		137
Florestal		5	10	2	37		6	2	37	2	99
Fortuna de Minas		2	4	1	15		3	1	15	1	40
Funilândia		3	6	2	21		4		21	1	56
Igaratinga		6	13	3			8	3	51	2	86
Inhaúma		4	8	2	31		5	2	31	1	84
Inimutaba		5	10	2	36		6		36	2	96
Itabira		72	155	36	595	62	95	36	595	24	1668
Itabirito		31	66	15	253		41	15	253	10	683
Itaguara		8	17	4	66		11	4	66	3	178
Itambé do Mato Dentro		2	3	1	11		2	1	11	1	30
Itapecerica		13	29	7	110		18	7	110	5	296
Itatiaiuçu		7	14	4			9	4	55	2	93
Itaverava		4					5	2	29	1	40
Jaboticatubas		12	25	6	97		16	6	97	4	262
Jaguaraçu		2	4	1	16	2	3		16		42
Jeceaba		3	7	2			4	2	27	1	45
Jequitibá		3	7	2		3	5		27	1	47
Nova União		4	8	2			5	2	29	1	48
Juatuba		15	33	8			20	8	126	5	213
Lagoa Dourada		8					10		64		81
Lamim		2	5	1			3		18	1	29
Leandro Ferreira		2	4	1			3		16	1	27
Maravilhas		5	10	3		4	6	3	39	2	70
Mário Campos		9	20	5			12	5	75	3	127
Marliéria		3	6	1	21	2	4	1	21	1	58
Martinho Campos		8	17	4			11	4	66	3	112
Mateus Leme		18	40	9	152		25	9	152	6	409
Matozinhos		22	48	11	184		30	11	184	8	496
Moeda		3	7	2	25		4	2	25	1	67
Moema		5	10	2			6	2	37	2	63
Morro do Pilar		2	5	1	17		3	1	17	1	45
Nova Era		11	23	6	89	9	14		89		240
Oliveira		25	54	13	208		33	13	208	9	561
Onça de Pitangui		2	4	1	16	2	3	1	16	1	44
Ouro Branco		24	51	12	195		31	12	195	8	525
Ouro Preto		44	96	22	369		59	22	369	15	995
Papagaios		9	20	5	77		13	5	77	3	207
Pará de Minas		56	120	28			74	28	462	19	785
Paraopeba		15	32	7	121	13	20		121	5	331
Passabém		1	3	1	9		2	1	9	1	25
Passa Tempo	Belo Horizonte	5	11	3	41		7	3	41	2	111
Pedra do Indaíá		3	5	1			3	1	20	1	34
Pequi		3	6	2			4	2	22	1	38
Perdigão		6	13	3			8	3	50	2	85
Piedade dos Gerais		3	7	2	25		4	2	25	1	67
Piracema		4	9	2			5	2	33	2	56
Piranga		11	23	6			14	6	88	4	150
Pitangui		17	36	8	137		22	8	137	6	370
Porto Firme		7	15	4	57		9	4	57	3	153
Prados		6		3					45	2	55
Presidente Bernardes		4	7	2	28			2	28		69
Prudente de Moraes		7	14	3	53		9	3	53	2	142
Queluzito		1		1	10		2	1	10	1	23
Raposos		10	21	5	81		13	5	81	3	219
Resende Costa		7	15			6		4	57		89
Ressaquinha		3		2			4	2	25	1	36
Rio Acima		6	13	3			8	3	50	2	85
Rio Doce		2	4	1	13		2	1	13	1	36
Rio Espera		4					5		30		39
Rio Manso		4	8	2			5	2	29	1	48
Rio Piracicaba		9	19	5			12	5	72	3	123
Ritópolis		3	7		25		4		25		63
Santa Bárbara do Tugúrio		3					4	2	23		30
Santa Cruz de Minas		5	11			5	7		43		70
Santa Maria de Itabira		7	14	3	54		9	3	54	2	145
Santana de Pirapama		5	11	3			7	3	40	2	69
Santana do Riacho		3	6	2	22		4	2	22	1	59
Santana dos Montes		3					3	1	19		26
Santo Antônio do Amparo		11	24	6			15	6	91	4	155
Santo Antônio do Monte		17	36	9			22	9	139	6	236
Santo Antônio do Rio Abaixo		1	3	1	9		2	1	9	1	25
São Brás do Suaçuí		2	5					1	19	1	27
São Domingos do Prata		11	23	6	88		14	6	88	4	238
São Francisco de Paula		4	9	2			6	2	33	2	57
São Gonçalo do Pará		7	15	4			10	4	58	3	99
São Gonçalo do Rio Abaixo		7	14	3	54	6	9	3	54	2	150
São Joaquim de Bicas		18	38	9	145		23	9	145	6	390
São José da Lapa		14	30	7	113		18	7	113	5	305
São José da Varginha		3	6	2			4	2	23	1	40
São José do Goiabal		4	8	2	29		5	2	29		76
São Sebastião do Oeste		4	8	2			5	2	32	2	54
São Sebastião do Rio Preto		1	2	1			2	1	8	1	14
São Tiago		7	14	4	55		9	4	55	2	147
Sarzedo		18	39	9	149		24	9	149	6	403
Sem-Peixe		2	4	1			3	1	14	1	24
Senhora de Oliveira		4		2				2	29	1	44
Senhora dos Remédios		7		3		3	5		53		62
Sete Lagoas		142	307	71	1179		189	71	1179	47	3182
Taquaraçu de Minas		3	5	1			3	1	20	1	34
Tiradentes		5	10	3				3	38		58
Vespasiano		74	161	37	618	64	99	37	618	25	1731

Tabela A.2: Atendimento em horas semanais da demanda por exames em Belo Horizonte:[1]: Mamógrafo, [2]: Ressonância Magnética, [3]: Tomógrafo, [4]: Ultrassom Convencional, [5]: Ultrassom Doppler, [T]: Total

Origem	Destino	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[T]
Araçáí				39		2	41
Barra Longa				101			101
Bela Vista de Minas				171			171
Belo Horizonte		2699	59			2527	5285
Betim		6419	161				6580
Bom Despacho		745					745
Caetanópolis				191			191
Capim Branco				161			161
Carandaí				418			418
Carmésia				43			43
Carmo da Mata				190			190
Carmópolis de Minas		283					283
Cipotânea				114			114
Cláudio		420					420
Conceição do Pará				91			91
Crucilândia		75	84				159
Desterro de Entre Rios				121			121
Dom Silvério						5	5
Esmeraldas		1037	1157			70	2264
Felixlândia						15	15
Ferros				176			176
Fortuna de Minas		43	48				91
Ibirité		2646					2646
Igarapé				663			663
Inimutaba				120			120
Itabirito				848			848
Itaguara		198	221				419
Itatiaiuçu				182			182
Itaúna		1378					1378
Jaboticatubas						19	19
Jaguaraçu				52			52
Jequitibá				89			89
Juatuba		376					376
Lagoa Santa		935					935
Lamim	Belo Horizonte			58			58
Maravilhas		117					117
Mário Campos		223					223
Mateus Leme		455					455
Matozinhos				615			615
Moeda				81			81
Moema				124			124
Nova Serrana		1296					1296
Pará de Minas		1384					1384
Passa Tempo				137			137
Pedro Leopoldo				1050			1050
Piranga				294			294
Pitangui				458			458
Pompéu		466					466
Porto Firme				189			189
Prados				148			148
Prudente de Moraes				175			175
Queluzito				33			33
Raposos				272			272
Ribeirão das Neves		4938					4938
Rio Acima		150	167				317
Rio Manso				95			95
Rio Piracicaba				242			242
Ritópolis				81			81
Santa Luzia		3237					3237
Santana do Riacho		65	72			4	141
Santo Antônio do Monte		415					415
São Brás do Suaçuí				62			62
São Gonçalo do Pará		174					174
São Gonçalo do Rio Abaixo				178			178
São José da Lapa				377			377
São Sebastião do Oeste		95	106				201
Sem-Peixe				48			48
Taquaraçu de Minas				67			67
Vespasiano		1852	2067				3919

# Apêndice B

## Atendimento das Demandas nos Municípios Escolhidos

Tabela B.1: Atendimento Médico por CEM: [1]: Angiologia, [2]: Cardiologia, [3]: Endocrinologia, [4]: Ginecologia, [5]: Mastologia, [6]: Nefrologia, [7]: Oftalmologia, [8]: Pediatria, [9]: Urologia, [T]:Total

Item	CEM	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[T]
1	Além Paraíba	54	77	17	273	19	69	19	257	10	793
2	Alfenas	57	122	32	1071	90	77	42	1087	18	2595
3	Almenara	195	203	79	422	31	215	124	737	47	2050
4	Araçuaí	37	112	13	746	53	77	40	767	13	1856
5	Arcos	166	417	84	877	97	179	38	789	38	2684
6	Barbacena	125	245	51	1532	107	138	49	1150	43	3439
7	Belo Horizonte	3541	7511	1713	26071	2085	4607	1691	29504	1140	77861
8	Boa Esperança	24	52	17	580	41	32	12	200	8	965
9	Bocaiúva	30	138	27	247	26	44	108	276	66	959
10	Bom Despacho	39	74	52	412	34	47	18	310	13	997
11	Brasília de Minas	71	119	31	503	25	57	27	654	15	1500
12	Caeté	55	92	17	523	30	83	13	447	11	1269
13	Campo Belo	33	70	19	471	45	43	16	269	11	977
14	Carangola	56	105	24	482	34	85	52	467	37	1341
15	Caratinga	79	166	68	453	77	181	27	453	22	1525
16	Conselheiro Lafaiete	92	165	38	1549	89	101	40	710	29	2810
17	Coronel Fabriciano	79	254	49	1104	64	106	37	1364	24	3079
18	Diamantina	115	193	30	901	147	115	101	864	51	2514
19	Divinópolis	183	305	77	1234	133	195	83	1173	50	3432
20	Espinosa	25	183	11	545	17	26	40	491	28	1363
21	Extrema	23	42	13	579	17	26	10	162	7	879
22	Formiga	56	160	21	509	67	94	23	477	19	1423
23	Governador Valadares	267	1163	175	2069	530	367	308	2158	266	7301
24	Guanhães	21	52	10	248	18	31	10	350	7	746
25	Guaxupé	31	130	20	554	60	42	22	705	29	1591
26	Ibirité	119	234	53	3387	317	141	53	1214	36	5552
27	Igarapé	51	52	12	738	140	90	12	347	8	1448
28	Ipatinga	185	547	116	1760	171	228	160	1814	58	5038
29	Itajubá	135	302	73	1153	82	314	58	1078	81	3274
30	Itaúna	57	120	32	566	67	76	40	525	20	1501
31	Ituiutaba	86	187	64	1105	80	121	110	718	61	2528
32	Iturama	34	73	17	337	24	45	17	279	11	834
33	Januária	183	226	52	1616	181	238	52	1636	38	4219
34	João Monlevade	80	109	38	847	87	136	27	858	16	2197
35	João Pinheiro	61	62	42	414	44	98	15	259	18	1011
36	Juiz de Fora	861	2024	485	4373	646	1263	471	6732	319	17173
37	Lagoa da Prata	45	139	24	291	67	129	17	255	26	990
38	Lagoa Santa	38	81	19	312	36	50	19	312	13	877
39	Lavras	138	149	80	1007	102	175	37	1248	34	2967
40	Leopoldina	88	84	32	1043	36	124	23	506	13	1948
41	Manhuaçu	132	220	73	1233	85	212	51	1005	25	3034
42	Mariana	61	119	25	1062	41	68	18	1059	15	2467
43	Minas Novas	63	86	10	455	26	39	10	500	13	1199
44	Montes Claros	363	1237	287	3130	384	556	201	3030	135	9321
45	Muriáe	94	157	45	818	74	131	33	539	22	1910
46	Nanuque	32	66	13	282	49	33	21	709	8	1212
47	Nova Lima	56	121	28	489	49	75	30	489	19	1354
48	Nova Serrana	52	113	26	432	79	73	26	692	18	1509
49	Novo Cruzeiro	56	86	54	185	16	65	20	155	25	660
50	Paracatu	55	136	28	456	75	79	44	475	23	1367
51	Passos	164	187	57	1206	80	303	61	1004	39	3100
52	Patos de Minas	91	528	63	1636	115	164	138	1364	75	4171
53	Patrocínio	128	121	36	784	70	109	73	535	49	1902
54	Pedro Leopoldo	52	122	27	474	88	75	19	508	13	1376
55	Pirapora	34	73	17	280	29	45	17	280	11	784
56	Poços de Caldas	99	749	60	1400	277	132	370	1305	51	4442
57	Pompéu	51	76	18	932	104	98	10	659	6	1953
58	Ponte Nova	55	104	34	782	58	73	24	810	12	1950
59	Pouso Alegre	318	396	101	1730	101	380	44	2347	62	5477
60	Ribeirão das Neves	198	428	99	1646	184	264	99	1646	66	4629



Item	CEM	A	C	E	G	M	N	O	P	U	T
61	Rio Pardo de Minas	31	57	11	534	45	57	12	603	6	1355
62	Sabará	89	193	41	672	70	108	41	742	27	1981
63	Salinas	147	112	40	513	107	100	14	478	11	1520
64	Santa Bárbara	118	189	84	1020	172	195	18	1204	30	3028
65	Santa Luzia	135	281	67	1123	117	180	65	1097	43	3105
66	Santa Rita do Sapucaí	86	111	19	411	36	62	21	403	10	1156
67	São João del Rei	86	116	41	904	79	72	33	647	19	1995
68	São Lourenço	117	141	55	1092	60	143	16	1151	37	2812
69	São Sebastião do Paraíso	42	267	34	478	52	56	21	487	25	1460
70	Taiobeiras	20	44	10	217	18	27	10	206	7	557
71	Teófilo Otoni	133	567	100	1689	87	253	49	835	53	3764
72	Três Corações	80	213	62	637	44	95	31	577	40	1777
73	Três Marias	19	41	10	519	25	31	10	404	7	1063
74	Uberaba	342	565	131	3777	241	348	118	2172	79	7769
75	Uberlândia	738	1777	391	4654	512	1089	285	6836	221	16502
76	Unai	100	227	41	611	88	115	52	841	30	2103
77	Varginha	166	300	128	1117	110	190	56	1174	68	3307
78	Várzea da Palma	23	50	14	332	20	31	12	193	8	682
79	Viçosa	92	131	50	528	104	110	31	607	19	1670
80	Visconde do Rio Branco	58	154	32	608	105	126	23	576	24	1705
Total		12375	27180	6268	103733	10072	16607	6271	103926	4183	290613

Tabela B.2: Atendimento da demanda por equipamento: [1]: Mamógrafo, [2]: Ressonância Magnética, [3]: Tomógrafo, [4]: Ultrassom Convencional, [5]: Ultrassom Doppler, [T]:Total

Item	Município	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[T]
1	Abadia dos Dourados				3016		3016
2	Abaeté				6038		6038
3	Abre Campo				3024		3024
4	Águas Formosas				3024	71	3095
5	Aimorés					68	68
6	Aiuruoca			994			994
7	Além Paraíba			589		46	635
8	Alfenas	6800	9976	1324		105	18205
9	Almenara				3085		3085
10	Alpinópolis				3024	57	3081
11	Alterosa				6046		6046
12	Alvarenga				3004		3004
13	Alvinópolis				3024		3024
14	Alvorada de Minas				2673		2673
15	Andradas					78	78
16	Andrelândia				3024		3024
17	Angelândia				3023		3023
18	Araçuaí				6195	117	6312
19	Araguari		5956	3883		148	9987
20	Araporã				2313		2313
21	Araújos				3022		3022
22	Araxá			1742	9072	107	10921
23	Arceburgo				3021		3021
24	Arcos					77	77
25	Areado				3022		3022
26	Aricanduva				3021		3021
27	Arinos				3024		3024
28	Ataléia				3024		3024
29	Baependi			318	6048	41	6407
30	Bambuí					100	100
31	Bandeira				1434		1434
32	Barão de Cocais	6758		535	9072	63	16428
33	Barbacena			2269		167	2436
34	Barroso					39	39
35	Belo Horizonte		32121	12696		2642	47459
36	Betim					492	492
37	Bicas					47	47
38	Boa Esperança					139	139
39	Bom Despacho			8072		81	8153
40	Borda da Mata					66	66
41	Brasilândia de Minas					27	27
42	Brasília de Minas	6788		843		85	7716
43	Brumadinho					79	79
44	Cabo Verde					24	24
45	Campina Verde					32	32
46	Campo Belo			901		77	978
47	Campos Gerais					67	67
48	Candeias					45	45
49	Capelinha					178	178
50	Carandaí					67	67
51	Carangola		3275	1005		108	4388
52	Caratinga		5520	1516		169	7205
53	Carmópolis de Minas					27	27
54	Cataguases	6758	1116	1245		133	9252
55	Caxambu					67	67
56	Cláudio					33	33
57	Conceição do Mato Dentro					59	59
58	Congonhas			897		74	971
59	Conselheiro Lafaiete	6917	3281	2115		180	12493
60	Contagem		10066	20047		665	30778
61	Coração de Jesus					112	112
62	Corinto					42	42
63	Coronel Fabriciano				1824	166	1990
64	Cruzília				304		304
65	Curvelo		4239	1326		158	5723
66	Diamantina		6820	6091		65	12976

Item	Município	MAM	RES	TOM	ULC	ULD	T
67	Divino	6758					6758
68	Divinópolis		5118	3925		430	9473
69	Elói Mendes					81	81
70	Ervália			314			314
71	Extrema			540		57	597
72	Formiga		4995	1133		87	6215
73	Frutal					72	72
74	Governador Valadares	6813	4277	11721		407	23218
75	Guanhães					85	85
76	Guaxupé			865		83	948
77	Ibiá					49	49
78	Ibirité	6769		2952			9721
79	Inhapim					91	91
80	Ipanema					50	50
81	Ipatinga	8987	22862	12115		373	44337
82	Ipuíuna					34	34
83	Itabira		3180	1991		156	5327
84	Itabirito					98	98
85	Itacarambi					56	56
86	Itajubá			1605		147	1752
87	Itanhandu					33	33
88	Itaobim					136	136
89	Itapagipe					31	31
90	Itapeçerica					45	45
91	Itaú de Minas					60	60
92	Itaúna			1537		104	1641
93	Ituiutaba				7746	139	7885
94	Iturama					73	73
95	Jacutinga	13507	4894	3903		39	22343
96	Janaúba			4724		227	4951
97	Januária			2204		122	2326
98	João Monlevade			1322		185	1507
99	João Pinheiro			1142		57	1199
100	Juiz de Fora		15001	10666		608	26275
101	Juruáia					28	28
102	Lagoa da Prata					78	78
103	Lagoa Santa			1043		88	1131
104	Lambari					27	27
105	Lavras			1707		119	1826
106	Leopoldina			880		108	988
107	Lima Duarte					52	52
108	Machado			691		143	834
109	Manga					34	34
110	Manhuaçu	6801	3561	1464		110	11936
111	Manhumirim			373			373
112	Mar de Espanha					43	43
113	Mariana	13605		998		88	14691
114	Mateus Leme					44	44
115	Matozinhos					71	71
116	Monte Azul					32	32
117	Monte Carmelo					92	92
118	Montes Claros		10000	14049	30103	469	54621
119	Muriae	6782	4160	12267		161	23370
120	Nanuque					106	106
121	Nova Lima			1558		101	1659
122	Nova Serrana	6766				159	6925
123	Oliveira			835		56	891
124	Ouro Branco					48	48
125	Ouro Fino					34	34
126	Ouro Preto					94	94
127	Paracatu			2998		100	3098
128	Pará de Minas			1545		136	1681
129	Paraisópolis					27	27
130	Paraopeba					48	48
131	Passos		4953	1892		130	6975
132	Patos de Minas		4092	5524		155	9771
133	Patrocínio		4591	1489		164	6244
134	Pedra Azul					91	91
135	Pedro Leopoldo					154	154
136	Perdões					40	40
137	Piranguçu					10	10
138	Pirapora			3544		56	3600
139	Pitangui	6758				60	6818
140	Piumhi			574		49	623
141	Poço Fundo					42	42
142	Poços de Caldas		4874	11543		207	16624
143	Ponte Nova		2530	998		91	3619
144	Porteirinha					127	127
145	Pouso Alegre	13558	5006	11461		174	30199
146	Prata					53	53
147	Alto Jequitibá					34	34
148	Ribeirão das Neves			5509		477	5986
149	Rio Pardo de Minas					125	125
150	Rio Pomba					54	54
151	Sabará	6852	4664	2249			13765
152	Sabinópolis					62	62
153	Sacramento			3065		59	3124
154	Salinas					152	152
155	Santa Luzia	13595				247	13842
156	Santa Rita do Sapucaí					56	56
157	Santo Antônio do Monte			463			463
158	Santos Dumont					83	83
159	São Domingos do Prata					44	44
160	São Francisco					113	113
161	São João del Rei		9422	1495		107	11024
162	São João Nepomuceno			438		36	474
163	São Lourenço			761		59	820

Item	Município	MAM	RES	TOM	ULC	ULD	T
164	São Sebastião do Paraíso			1370		76	1446
165	Serra do Salitre					22	22
166	Sete Lagoas		3685	3945		267	7897
167	Taiobeiras			4187			4187
168	Teófilo Otoni		11628	11533		267	23428
169	Timóteo		1624			133	1757
170	Três Corações			1303		94	1397
171	Três Pontas			941		126	1067
172	Tupaciguara					33	33
173	Turmalina					88	88
174	Ubá	6758	1694	1889		163	10504
175	Uberaba		12436	8191		333	20960
176	Uberlândia			7978		757	8735
177	Unai			2868		151	3019
178	Varginha			2339		231	2570
179	Várzea da Palma					65	65
180	Vazante	3558				42	3600
181	Vespasiano					171	171
182	Viçosa		3268	1311		157	4736
183	Visconde do Rio Branco			697		98	795
Total		161888	234885	273160	132122	20986	823041