



MODELAGEM MATEMÁTICA PARA LOCALIZAÇÃO DE BASES DE
DESPACHO DE VEÍCULOS DE RESGATE: UM ESTUDO DE CASO NO
MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO

Thayse Ferrari

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Orientador: Carlos David Nassi

Rio de Janeiro

Janeiro de 2017

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA LOCALIZAÇÃO DE BASES DE
DESPACHO DE VEÍCULOS DE RESGATE: UM ESTUDO DE CASO NO
MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO

Thayse Ferrari

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Examinada por:

Prof. Carlos David Nassi, Dr.Ing.

Prof. Glaydston Mattos Ribeiro, D.Sc.

Prof. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JANEIRO DE 2017

Ferrari, Thayse

Modelagem matemática para localização de bases de despacho de veículos de resgate: um estudo de caso no município do Rio de Janeiro / Thayse Ferrari. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XV, 129 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Carlos David Nassi

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 108-121.

1. Localização de facilidades. 2. Bases de despacho de veículos de resgate. 3. Otimização. I. Nassi, Carlos David. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

*Dedico este trabalho aos meus pais, Laurindo e Gorete,
por todo amor, confiança e dedicação, fundamentais para tornar
realidade mais esse sonho.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ser minha luz, meu rochedo e sempre guiar meus caminhos. Sua presença constante em minha vida me fez enxergar os problemas como oportunidades de crescimento.

Aos meus pais, Laurindo e Gorete, pela dedicação e amor incondicionais, por serem meus exemplos e por não medirem esforços para que eu pudesse realizar meus sonhos, ainda que para isso tivessem que abdicar de seus próprios. Meu muito obrigada nunca será o bastante. Amo vocês incondicionalmente!

À minha irmã Talucha, pelo apoio e carinho em todos os momentos.

Ao meu namorado Marcus Vinicius, pelo amor, companheirismo, compreensão e amizade, construídos diariamente. Sem seu apoio essa conquista não teria sido possível.

Ao meu afilhado, Hiago, que mesmo à distância foi capaz de tornar mais leve dias difíceis, com seu frescor e inocência.

À toda minha família e amigos, pelo carinho e por estarem sempre ao meu lado. Vocês souberam entender, mesmo que com o coração apertado, toda a minha ausência e, ainda assim, me animaram e me encheram de entusiasmo e amor.

Ao meu orientador, professor Carlos David Nassi, por todo conhecimento transmitido.

À equipe dos projetos Bilhete Único, Pão de Açúcar e TransÔnibus: Frederico Campos, Sergio Lopes, Christiano Machado, Igor Rocha, Luciana Nascimento, Gabriel Tenenbaum e Alan Jeferson. Agradeço especialmente, à Marcia Estrada, por toda amizade, companheirismo e ensinamentos. Participar desses projetos me proporcionou enorme aprendizado, pessoal e profissional, que levarei por toda a vida.

Aos colegas do Programa de Engenharia de Transportes, especialmente, Inaê Lucato, Tulio Silveira, Maraísa Esch, Rodrigo Toffano, Igor Godeiro, Bruno Guida, Beatriz Lagnier, Lygia Bronneberg, Marcello Victorino, Luiza Franca, Breno Garcia, Bruno Salezze, Pedro Basilio, Ewerton Torres, Victor Albino, Luiz Saldanha e Victor Hugo Souza.

À Jane Correa e Natalia Viegas por todo apoio que recebi nesses últimos anos. Sua alegria e disposição em ajudar contribuíram para minha formação acadêmica e construção de uma grande amizade.

Ao Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro pelas informações e sugestões que contribuíram para o aperfeiçoamento desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo auxílio concedido.

Aos professores Glaydston Mattos Ribeiro e Laura Silvia Bahiense da Silva Leite por aceitarem participar da banca e por toda contribuição para aprimoramento da pesquisa.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA LOCALIZAÇÃO DE BASES DE
DESPACHO DE VEÍCULOS DE RESGATE: UM ESTUDO DE CASO NO
MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO

Thayse Ferrari

Janeiro/2017

Orientador: Carlos David Nassi

Programa: Engenharia de Transportes

Os Serviços Médicos de Emergência são considerados elementos críticos dos sistemas de saúde, pois necessitam assegurar que seu nível de serviço esteja adequado à população a qual serve, uma vez que dele depende o agravamento ou não do estado de saúde da vítima. Neste contexto, os Problemas de Localização de Facilidades vêm sendo aplicados com a finalidade de indicar pontos estratégicos para a localização de bases de veículos que realizam o atendimento às chamadas de emergência. No município do Rio de Janeiro este tipo de serviço é de responsabilidade do Corpo de Bombeiros Militar, que possui unidades distribuídas ao longo do território, de onde são despachados os veículos de resgate. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é propor uma modelagem matemática para subsidiar o planejamento da localização de bases de despacho de veículos de resgate, que leve em conta a maximização da população coberta e dos diferentes tipos de ocorrência registrados e a minimização do número de bases de despacho abertas e da distância entre a base de despacho e o ponto de demanda. Pesquisas bibliográficas e documentais foram realizadas com o intuito de compreender as principais características da localização/alocação de bases de despacho de ambulâncias e dos principais modelos matemáticos de localização de facilidades. Foram implementados testes para 11 cenários, com variações no número de bases e de veículos utilizados que, com o auxílio de ferramentas de georreferenciamento, possibilitaram a análise da cobertura e do tempo de atendimento para cada base, em cada cenário.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MATHEMATICAL MODELING FOR LOCATION TO RESCUE VEHICLES
DISPATCHING BASES: A CASE STUDY IN RIO DE JANEIRO

Thayse Ferrari

January/2017

Advisor: Carlos David Nassi

Department: Transportation Engineering

The Emergency Medical Services are considered critical elements of modern health services, mainly to ensure that the level of service is appropriate for the population of the region that serve, as it depends on the service the worsening or not of the victim's health condition. We applied Facility Location Problems, in this context, to indicate strategic points to the location of rescue vehicles dispatching bases attending emergency calls. In the city of Rio de Janeiro, this type of service is the responsibility of the Military Fire Department of the State of Rio de Janeiro, which has units distributed throughout the territory, where the rescue vehicles are dispatched. Therefore, the objective of this work is to propose a mathematical modeling to support the planning of the location of rescue vehicles dispatching bases, focusing on the maximization of the population coverage and different types of occurrences recorded and the minimization of the number of dispatch bases opened and the distance between the dispatch bases and the demand points. Bibliographic and documentary researches were carried out with the purpose of understanding the main characteristics of the location / allocation of ambulance dispatch bases and the main mathematical models of facilities location. Tests were implemented for 11 scenarios with variations in the number of bases and vehicles used which, with the help of georeferencing tools, allowed us to evaluate the coverage and service time for each base in each scenario.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos Geral e Específicos.....	4
1.2	Procedimento Metodológico.....	6
1.3	Estrutura da Dissertação.....	7
2	OS SERVIÇOS MÉDICOS DE EMERGÊNCIA	9
2.1	Conceituação dos <i>Emergency Medical Services</i>	9
2.2	Características das Operações de EMS	13
2.3	Medidas de Desempenho Associadas às Operações EMS	16
2.4	Política Nacional de Atenção às Urgências.....	18
2.5	Variáveis Explicativas para a Ocorrência de Chamadas de Emergência	21
2.6	Considerações Finais	23
3	MODELOS DE LOCALIZAÇÃO DE FACILIDADES	24
3.1	Conceitos Sobre Localização de Facilidades	24
3.2	Principais Modelos Presentes na Literatura e suas Características	26
3.2.1	Modelos de Cobertura	28
3.2.2	Modelo p-Mediana.....	32
3.2.3	Modelo p-Center.....	34
3.3	Aplicação de Modelos de Localização de Facilidades em Serviços Médicos de Emergência	36
3.4	Considerações Finais	40
4	MODELAGEM MATEMÁTICA PROPOSTA	41
4.1	Descrição do Problema, Premissas e Parâmetros Adotados.....	41
4.2	Modelo Matemático	44
4.3	Considerações Finais	47
5	ESTUDO DE CASO.....	48
5.1	Descrição da Área de Estudo	48
5.1.1	Análise espacial e temporal das chamadas de emergência na área de estudo	53
5.1.2	Análise estatística dos dados de chamadas.....	57
5.2	Definição dos Cenários Propostos	62
5.2.1	Parâmetros comuns para os cenários propostos	63
5.2.2	Definição dos cenários propostos	64

5.3	Considerações Finais	66
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	68
6.1	Análise dos Resultados Cenário a Cenário.....	68
6.1.1	Resultados do Cenário 1	69
6.1.2	Resultados do Cenário 2	75
6.1.3	Resultados do Cenário 3	79
6.1.4	Resultados do Cenário 4	84
6.1.5	Resultados do Cenário 5	87
6.1.6	Resultados do Cenário 6	92
6.1.7	Resultados dos Cenários 7 a 11	96
6.2	Análise Comparativa dos Resultados Obtidos	100
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	105
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
	APÊNDICE A – PERCENTUAL DE UTILIZAÇÃO DAS BASES DE DESPACHO DE VEÍCULOS DE RESGATE POR CENÁRIO	122
	APÊNDICE B – MAPAS DE COBERTURA DOS CENÁRIOS 7 A 11	125
	APÊNDICE C – GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO DOS TEMPOS DE RESPOSTA NOS CENÁRIOS DESAGREGADOS POR ÁREA DE PLANEJAMENTO.....	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Procedimento metodológico proposto	6
Figura 2.1 – Segmentação básica do processo de um EMS.	15
Figura 5.1 – Localização geográfica do município do Rio de Janeiro	48
Figura 5.2 – Representação das Áreas de Planejamento (AP) do Rio de Janeiro	49
Figura 5.3 – Representação dos setores censitários do município	49
Figura 5.4 – Representação das bases de atendimento do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro por AP.....	51
Figura 5.5 – Representação da rede rodoviária do Rio de Janeiro	52
Figura 5.6 – Distribuição das chamadas de emergência por bairros do Rio de Janeiro	53
Figura 5.7 – Distribuição das chamadas de emergência por AP do Rio de Janeiro	54
Figura 5.8 – Distribuição das chamadas de emergência por local de ocorrência.....	55
Figura 5.9 – Distribuição das chamadas de emergência ao longo do dia.....	55
Figura 5.10 – Distribuição das chamadas de emergência por meses do ano.....	56
Figura 5.11 – Distribuição das chamadas de emergência por dia da semana.....	56
Figura 5.12 – Distribuição das chamadas de emergência por tipo de ocorrência	57
Figura 5.13 – Distribuição espacial das chamadas de emergência no Rio de Janeiro...	58
Figura 6.1 – Áreas de cobertura das 36 bases utilizadas no Cenário 1	70
Figura 6.2 – Tempo médio de resposta das bases no Cenário 1 por AP	72
Figura 6.3 – Tempo máximo de resposta das bases no Cenário 1 por AP	73
Figura 6.4 – Quantidade de veículos de resgate por AP no Cenário 1	73
Figura 6.5 – Setores censitários com população sem atendimento no Cenário 1.....	74
Figura 6.6 – Densidade demográfica dos setores censitários não atendidos e localização das possíveis novas bases operacionais.	75
Figura 6.7 – Áreas de cobertura das 35 bases utilizadas no Cenário 2	76
Figura 6.8 – Tempo médio de resposta das bases no Cenário 2 por AP	77
Figura 6.9 – Tempo máximo de resposta das bases no Cenário 2 por AP	78
Figura 6.10 – Quantidade de veículos de resgate por AP no Cenário 2.....	79
Figura 6.11 – Áreas de cobertura das 36 bases utilizadas no Cenário 3	80
Figura 6.12 – Tempo médio de resposta das bases no Cenário 3 por AP	81
Figura 6.13 – Tempo máximo de resposta das bases no Cenário 3 por AP	82
Figura 6.14 – Tempo mínimo de resposta das bases no Cenário 3 por AP.....	82
Figura 6.15 – Quantidade de veículos de resgate por AP no Cenário 3.....	83

Figura 6.16 – Áreas de cobertura das 37 bases utilizadas no Cenário 4	84
Figura 6.17 – Tempo médio de resposta das bases no Cenário 4 por AP	85
Figura 6.18 – Tempo máximo de resposta das bases no Cenário 4 por AP	86
Figura 6.19 – Quantidade de veículos de resgate por AP no Cenário 4.....	87
Figura 6.20 – Áreas de cobertura das 38 bases utilizadas no Cenário 5	88
Figura 6.21 – Tempo médio de resposta das bases no Cenário 5 por AP	89
Figura 6.22 – Tempo máximo de resposta das bases no Cenário 5 por AP	90
Figura 6.23 – Tempo mínimo de resposta das bases no Cenário 5 por AP.....	91
Figura 6.24 – Quantidade de veículos de resgate por AP no Cenário 5.....	91
Figura 6.25 – Áreas de cobertura das 43 bases utilizadas no Cenário 6	93
Figura 6.26 – Tempo médio de resposta das bases no Cenário 6 por AP	94
Figura 6.27 – Tempo máximo de resposta das bases no Cenário 6 por AP	94
Figura 6.28 – Quantidade de veículos de resgate por AP no Cenário 6.....	95
Figura 6.29 – Tempo médio de resposta das bases nos Cenários 7 a 11, por AP	97
Figura 6.30 – Percentual médio de utilização das bases nos Cenários 7 a 11, por AP .	98
Figura 6.31 – Quantidade de veículos de resgate por AP nos Cenários 7 a 11	99
Figura 6.32 – Comparação da população coberta em cada cenário	101
Figura 6.33 – Comparação entre a distribuição dos veículos e o percentual de registros por AP.....	102
Figura 6.34 – Comparação entre os tempos de resposta, em minutos, por cenários ...	102
Figura 6.35 – Comparação entre os percentuais médios de utilização das bases nos cenários, por AP	103
Figura 6.36 – Tempo de processamento dos resultados por cenário	104
Figura 6.37 – Número de iterações realizadas para chegar aos resultados por cenário	104
Figura B.1 – Áreas de cobertura das 35 bases utilizadas no Cenário 7.....	125
Figura B.2 – Áreas de cobertura das 36 bases utilizadas no Cenário 8.....	125
Figura B.3 – Áreas de cobertura das 37 bases utilizadas no Cenário 9.....	126
Figura B.4 – Áreas de cobertura das 38 bases utilizadas no Cenário 10.....	126
Figura B.5 – Áreas de cobertura das 43 bases utilizadas no Cenário 11.....	127
Figura C.1 – Tempo médio de resposta das bases nos cenários por AP	128
Figura C.2 – Tempo mínimo de resposta das bases nos cenários, por AP.....	128
Figura C.3 – Tempo máximo de resposta das bases nos cenários, por AP	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resumo dos modelos de localização de facilidade de emergência.....	39
Tabela 5.1 – Resultado geral da regressão linear simples	60
Tabela 5.2 – Resultado da regressão linear múltipla para ocorrências gerais	60
Tabela 5.3 – Resultado da regressão linear múltipla para acidentes de trânsito	61
Tabela 5.4 – Definição dos cenários de aplicação do modelo matemático proposto	66
Tabela 6.1 – Resumo dos resultados dos cenários.....	69
Tabela 6.2 – Tempo de resposta e utilização das bases por cenário proposto.....	69
Tabela A.1 – Percentual de utilização das bases de despacho no cenário-base	122
Tabela A.2 – Percentual de utilização das bases de despacho nos Cenários 2 a 6.....	123
Tabela A.3 – Percentual de utilização das bases de despacho nos Cenários 7 a 11	124

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Taxonomia dos PLFs.....	27
---	----

LISTA DE SIGLAS

- AMEXCLP – *Adjusted Maximum Expected Covering Location Problem*
- AP – Área de Planejamento
- CBMERJ – Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro
- CID – Classificação Internacional de Doenças
- DACL – *Dynamic Available Coverage Location*
- DDSM – *Dynamic Double Standard Model*
- DSM – *Double Standard Model*
- EMS – *Emergency Medical Services*
- FLEET – *Facility-Location, Equipment-Emplacement Technique*
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- LSCM – *Location Set Covering Model*
- LSCP – *Location Set Covering Problem*
- MALP – *Maximum Availability Location Problem*
- MCLP – *Maximal Covering Location Problem*
- MCMCLP – *Modular Capacitated Maximal Covering Location Problem*
- mDSM – *multi-period Double Standard Model*
- MEXCLP – *Maximum Expected Covering Location Problem*
- PLBDVR – Problema de Localização de Bases de Despacho de Veículos de Resgate
- PLF – Problema de Localização de Facilidades
- PNAU – Política Nacional de Atenção às Urgências
- QRLSCP – *Queueing Reliability Location Set Covering Problem*
- SAMU – Serviço de Atendimento Móvel de Urgência
- SCP – *Set Covering Problem*
- SUS – Sistema Único de Saúde
- TEAM – *Tandem Equipment Allocation Model*
- TIMEXCLP – *Multi-period Maximum Expected Coverage Location Problem*
- TTM – *Two-Tiered Model*
- UBM – Unidades de Bombeiro Militar

1 INTRODUÇÃO

O planejamento de políticas públicas relacionadas a serviços de emergência médica, por tratar de questões de acesso a saúde, tem papel fundamental na qualidade de vida da população e influencia diretamente no desenvolvimento social e econômico de um país. Prezar pela excelência na etapa de planejamento viabiliza o correto direcionamento de investimentos em infraestrutura e operação dos serviços, suscitando grandes melhorias para a população.

Os serviços médicos de emergência ou *Emergency Medical Services* (EMS), como são conhecidos internacionalmente, são tidos como elementos críticos dos sistemas de saúde modernos. Responsáveis pelo componente pré-hospitalar, que segundo Aboueljine *et al.* (2014), compreende desde a chamada de emergência até a estabilização do paciente e seu transporte a uma unidade adequada, tais serviços se mostram desafiadores para pesquisadores da área, uma vez que suas bases de atendimento precisam estar localizadas estrategicamente sobre a região que servem, de forma que a operação seja a mais eficiente possível (Bélanger *et al.*, 2016).

Nas últimas décadas, os EMS têm atraído a atenção de uma grande quantidade de pesquisadores, especialmente por seu relevante impacto na vida das pessoas. Isso ocorre porque, segundo Li *et al.* (2011), se o sistema de resposta de emergência não for capaz de fornecer o serviço prontamente, a vida das pessoas é posta em perigo. Tal situação, que exige que a localização dessas instalações seja feita de maneira eficiente, é agravada, ainda, pela limitação de recursos disponíveis, já que muitas vezes este tipo de serviço é prestado por órgãos governamentais.

A importância da localização estratégica das bases se dá devido à natureza incerta das chamadas de emergência, relativas ao horário de chegada e suas localizações, fatores que tendem a prejudicar a operacionalização do serviço (Kergosien *et al.*, 2015). Além desses fatores, outros contribuem para a incerteza dessa operação, como as variações no padrão da demanda ao longo do tempo, as mudanças no tempo de viagem ao longo do dia e da rede de transporte, além da própria saída de veículos para atendimento de chamadas (Nair e Miller-Hooks, 2009; Bélanger *et al.*, 2016).

Como o principal objetivo dos EMS é reduzir as taxas de mortalidade, de invalidez e o sofrimento, bem como melhorar as chances de recuperação do paciente (Maleki *et al.*, 2014; Aringhieri *et al.*, 2007), uma estratégia eficaz de expedição das ambulâncias, que seja capaz de melhorar o desempenho do sistema, torna-se fator importante (Bandara *et*

al., 2013). Isso exige, entre outros aspectos, que os tomadores de decisão lidem com a difícil tarefa de localizar bases de despacho de ambulâncias de maneira otimizada para atender às chamadas.

Diariamente esses profissionais precisam superar diversos fatores de incerteza, como a frequência das chamadas, os locais das ocorrências, a capacidade disponível de veículos e equipes e a duração do tempo de viagem até o local do resgate (Aboueljinane *et al.*, 2013; Kergosien *et al.*, 2015; Stein *et al.*, 2015). Segundo Maleki *et al.* (2014), a situação torna-se ainda mais complexa com a combinação de alguns destes fatores como, por exemplo, quando o número de chamadas de emergência aumenta e as condições do tráfego pioram. Tais situações impactam diretamente em uma das principais preocupações dos EMS, providenciar, de maneira rápida e eficiente, a assistência médica inicial às vítimas.

Diante da necessidade de não apenas cumprir com este objetivo, mas também otimizar os recursos na operacionalização do mesmo, buscam-se atingir determinadas medidas de desempenho. Uma das principais maneiras de mensurar este comportamento consiste em avaliar o tempo decorrido entre uma chamada de emergência e a chegada de assistência ao local (Takeda *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2014; Moore, 2009), tendo em vista que este é um dos fatores mais críticos, uma vez que com o serviço não fornecido prontamente aumentam as chances de efeitos nocivos aos pacientes (Su *et al.*, 2015).

A correlação existente entre o tempo de resposta às chamadas de emergência e a perspectiva de sobrevivência do paciente tem sido amplamente difundida na literatura (Stiell *et al.*, 2008; Erkut *et al.*, 2008). Bandara *et al.* (2013) reforçam que o tempo de resposta é importante para minimizar o impacto do incidente, no entanto, ele não possui o mesmo peso em todos os tipos de atendimento. Com isso, assume-se que outro fator relevante é o grau de urgência da chamada, tendo em vista que em alguns tipos de emergência o fator temporal pode ser mais crítico do que em outros.

Diante disso, a redução dos tempos de resposta é um fator essencial para a melhoria do atendimento e redução da mortalidade, em especial, quando as chamadas de emergência são originados por lesões graves, como paradas cardiorrespiratórias, acidentes vasculares cerebrais e acidentes de trânsito, entre outros (Elvik *et al.*, 2009; Wilde, 2013).

Com a finalidade de garantir a qualidade dos serviços de emergência, segundo Billhardt *et al.* (2014), muitos países passaram a determinar limites de tempo de resposta para as organizações prestadoras de serviços de atendimento pré-hospitalar, seja por meio

de leis ou mesmo por normas contratuais. Em países europeus esses limites normalmente variam entre 8 e 15 min. Um exemplo disso é que no Reino Unido, de acordo com uma normal nacional, no mínimo 75% das chamadas de Categoria A, que apresentam alto risco de vida, devem ser respondidas em até 8 minutos.

Mas estes não são os únicos países a determinarem um padrão de tempo de resposta ao atendimento. Em diversos outros países também foram estipulados tempos de resposta padrão para o atendimento de emergências (Gendreau *et al.*, 2001; Galvão *et al.*, 2005; Ball e Lin, 1993). O Brasil não apresenta um tempo de resposta ao atendimento definido para toda a nação, entretanto, alguns estados e municípios estipularam suas próprias metas. Em Brasília e Curitiba, por exemplo, o tempo de resposta deve ser de até 10 minutos, segundo Minayo e Deslandes (2008).

No entanto, para que tais metas possam ser atingidas faz-se necessário aplicar grande empenho nas etapas de planejamento da localização da instalação de emergência, em especial, em dois aspectos: 1) na seleção de locais para instalação de bases de despacho, que podem ser fixas ou móveis; e 2) na definição do número de veículos atribuídos a cada base, dada a capacidade física do local (Takeda *et al.*, 2007).

Neste contexto surgiram adaptações do Problema de Localização de Facilidades (PLF) aplicadas à localização de bases de despacho de veículos de resgate. De acordo com Su *et al.* (2015), vários modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para resolver este tipo de problema, em especial os modelos de cobertura, com aplicações amplamente divulgadas na literatura (Schilling *et al.*, 1993; Brotcorne *et al.*, 2003; Alsalloum e Rand, 2006; Li *et al.*, 2011; Farahani *et al.*, 2012; Ibri *et al.*, 2012; Knight *et al.*, 2012; Shariat-Mohaymany *et al.*, 2012; Shariff *et al.*, 2012; Yin e Mu, 2012).

Nos modelos de cobertura, busca-se o maior número possível de pontos de demanda cobertos, neste caso locais de demanda atendidos dentro de um padrão de cobertura pré-definido para uma ambulância. Assim, dado um padrão de cobertura para o serviço, que pode ser, por exemplo, a distância ou o tempo de viagem ao longo das vias públicas, o objetivo do Problema de Localização de Máxima Cobertura consiste em localizar um número fixo de facilidades que forneçam o serviço ao maior número possível de pontos de demanda (Yin e Mu, 2012).

Considerando esta abordagem, este trabalho propõe o Problema de Localização de Bases de Despacho de Veículos de Resgate (PLBDVR) que, a partir de locais pré-definidos para receber bases de despacho de ambulâncias, deve determinar quais delas devem ser utilizadas e a quais locais de demanda devem ser alocadas. Com isso, constata-

se a existência de um *trade off* entre a maximização da cobertura, priorizando a cobertura de áreas de demanda com maior registro histórico de atendimentos, e a minimização da quantidade de bases abertas e da distância entre essas bases e os pontos de demanda. Por se tratarem de objetivos conflitantes, a solução de qualquer um deles implica na piora dos demais, o que ressalta a necessidade de se alcançar um ponto de equilíbrio entre os mesmos.

No entanto, do ponto de vista de modelagem matemática e solução, os problemas de localização-alocação têm características computacionais complexas, pois são do tipo *NP-Hard*. Isso significa que, para este tipo de problema, o tempo necessário para solução cresce exponencialmente com o aumento da rede objeto de estudo (Garey e Johnson, 1979; Negreiros e Palhano, 2006). Em termos práticos, para problemas reais que envolvem grandes redes de transportes e extensão territorial, além da necessidade de melhor utilizar os recursos, o tempo e a complexidade computacional envolvidos são, na maioria das vezes, elevados, principalmente em função dos objetivos conflitantes.

1.1 Objetivos Geral e Específicos

Diante do exposto, surge a seguinte problemática: dado um conjunto de locais pré-definidos, como determinar a melhor localização para bases de despacho de veículos de resgate considerando a cobertura da rede, o número de bases utilizadas e a distância entre as bases de despacho e os pontos de demanda das chamadas?

Sendo assim, o objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver uma metodologia com modelagem matemática para subsidiar políticas públicas relacionadas a localização de bases de despacho de veículos de resgate em emergências, visando a ampliação e melhoria do serviço, neste caso representados pela melhor utilização da cobertura, das bases de despacho e do tempo de resposta.

Para tanto, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

1. Analisar o funcionamento de serviços médicos de emergência, identificando os principais parâmetros envolvidos, de forma a contribuir para a fixação de premissas e restrições que norteiem o processo de localização de bases de despacho e de alocação de veículos de resgate a essas bases;
2. Buscar na literatura os principais modelos matemáticos existentes pertinentes ao problema de pesquisa deste trabalho, para que possam contribuir para o desenvolvimento do modelo matemático a ser proposto;

3. Mapear as chamadas de emergência registrados pelo Corpo de Bombeiros Militar para o município de Rio de Janeiro no ano de 2014 e levantar possíveis variáveis explicativas dessas ocorrências;
4. Desenvolver um modelo matemático de localização de bases de despacho de veículos de resgate que considere a maximização da cobertura da população e dos diferentes tipos de ocorrências registrados e a minimização das bases de despacho utilizadas, bem como da distância entre as bases e os pontos de demanda; e
5. Aplicar o modelo matemático a uma situação real com o intuito de melhor compreender as características da formulação e permitir aplicações futuras.

Acredita-se que a utilização de um modelo matemático no processo de planejamento de serviços médicos de emergência, em especial à localização de bases de despacho e alocação de veículos de resgate a essas bases, possa contribuir para o fornecimento de um serviço melhor. Por meio dele é possível buscar: o aumento da cobertura de atendimento, tanto à população quanto aos tipos de ocorrência (que foram divididas em ocorrência do Tipo 1 ou gerais e ocorrências do Tipo 2 ou relativas a acidentes de trânsito); e a redução tanto da distância percorrida entre as bases de despacho e as áreas de demanda (que influencia diretamente no tempo de resposta do serviço) quanto da quantidade de recursos utilizados.

Com isso, a contribuição deste trabalho se dá em duas principais vertentes. Primeiramente no âmbito governamental, uma vez que este estudo pode fornecer uma importante ferramenta de apoio ao processo de planejamento de serviços médicos de emergência, com vistas à melhoria deste tipo de serviço e dos recursos nele empregados. A segunda vertente está relacionada a questões socioeconômicas, uma vez que a eficácia no atendimento de emergência é capaz de possibilitar a diminuição da gravidade das sequelas adquiridas pelo paciente, em função da redução do tempo de resposta, implicando diretamente na vida produtiva dos indivíduos.

Ressalta-se, como delimitação deste estudo, a premissa de adotar parâmetros e características identificadas nos serviços médicos de emergência brasileiros, em especial no Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU) e no resgate do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro (CBMERJ). Para tanto, considerou-se como áreas de demanda o conjunto de setores censitários definidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Além disso, estimativas e simplificações

foram adotadas para representação de capacidade de atendimento das bases de despacho junto à formulação do modelo matemático.

1.2 Procedimento Metodológico

Nesta seção, apresenta-se o procedimento metodológico definido para alcançar os objetivos propostos neste trabalho. Tal procedimento pode ser representado por meio de um fluxograma (Figura 1.1) segmentado, basicamente, em três etapas: Base Conceitual, Modelagem Matemática e Aplicação.

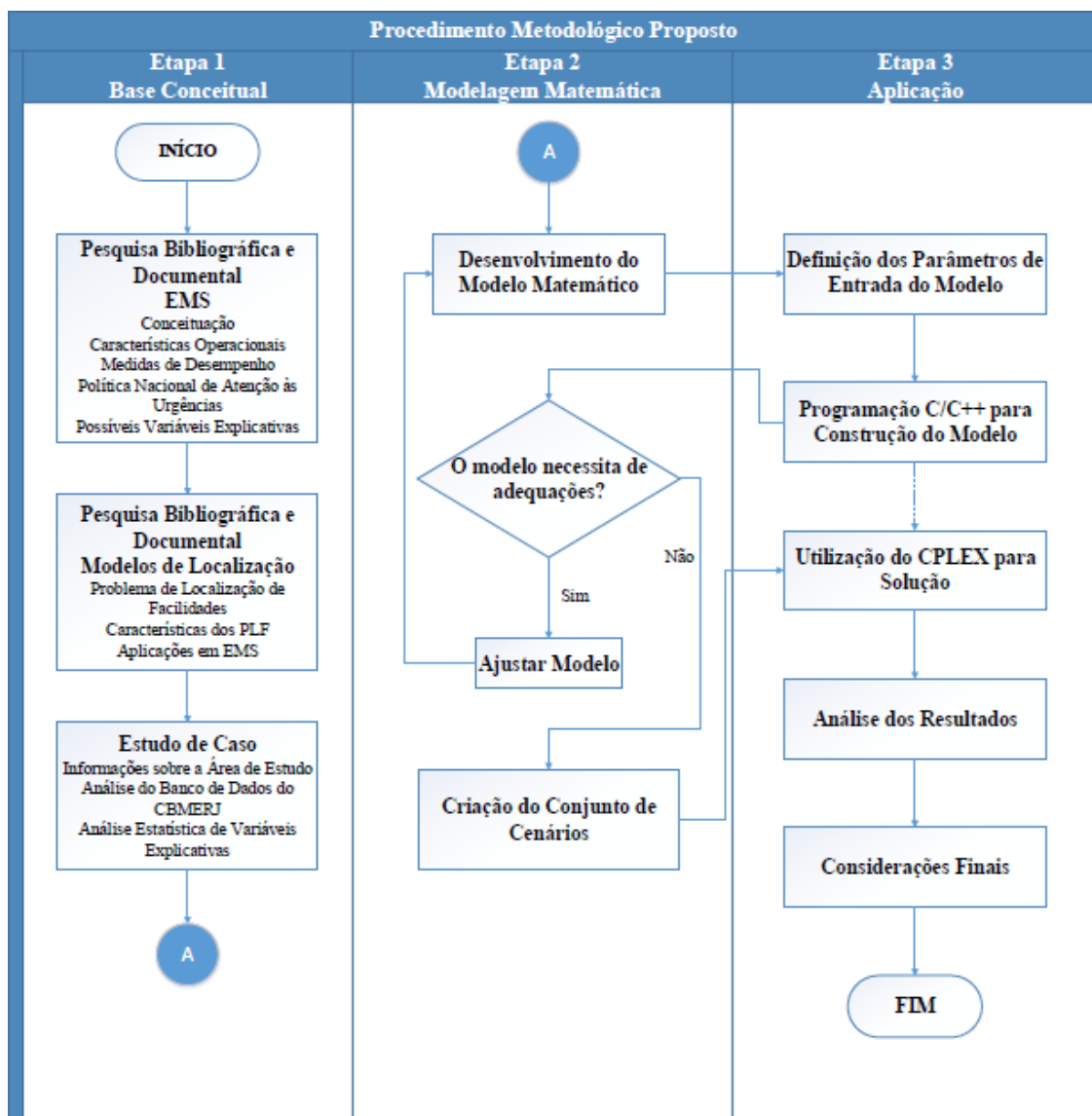


Figura 1.1 – Procedimento metodológico proposto

A primeira etapa compreende o levantamento bibliográfico de conceitos, características, metodologias, necessidades e restrições relacionadas aos serviços médicos

de emergência. Esta etapa compreende, ainda, a revisão da literatura no que concerne à modelagem matemática de localização de facilidades, de forma a estabelecer elementos consolidados para o desenvolvimento do modelo matemático. Por fim, esta etapa trata do levantamento de informações pertinentes ao local de aplicação do estudo de caso proposto, a cidade do Rio de Janeiro.

A segunda etapa consiste no desenvolvimento e proposição do modelo matemático de otimização para o PLBDVR. Nesta etapa, codificações em linguagem C/C++ são necessárias para representação explícita do modelo matemático em função dos parâmetros de entrada. Ainda nesta etapa, devem ser estabelecidos cenários, propostos com base nos resultados da Etapa 1.

Já a Etapa 3 trata dos experimentos computacionais realizados para os cenários estabelecidos, executados por meio do *solver* ILOG IBM CPLEX 12.6 (IBM, 2015). Além disso, esta etapa contempla as análises dos resultados e as considerações finais do estudo.

1.3 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho está dividido em sete capítulos. No Capítulo 1 foi feita uma contextualização do tema, que aborda o panorama geral do estudo, o problema de pesquisa, os objetivos geral e específicos e o procedimento metodológico proposto para o estudo. No Capítulo 2 são feitas considerações sobre os serviços médicos de emergência, principalmente, no que diz respeito aos conceitos envolvidos, metodologia e dinâmica de atendimento. Este capítulo aborda, ainda, o detalhamento deste tipo de serviço em âmbito nacional, com destaque para parâmetros e características presentes em sua operação, e o levantamento de possíveis variáveis explicativas para as chamadas de emergência.

Já no Capítulo 3 discorre-se sobre os Problemas de Localização de Facilidades, com o objetivo de fundamentar o desenvolvimento do modelo matemático proposto neste trabalho por meio de uma revisão bibliográfica acerca de modelos de localização-alocação presentes na literatura. Além disso, acrescenta-se a este capítulo algumas aplicações de modelagem matemática relacionada com serviços médicos de emergência, em especial a localização de veículos de resgate.

O Capítulo 4 disserta sobre o problema abordado neste trabalho, bem como os parâmetros e premissas considerados no desenvolvimento do modelo matemático para localização de bases de despacho de veículos de resgate. Tal capítulo expõe de maneira

detalhada o modelo matemático proposto, em especial sua função objetivo e as restrições envolvidas.

O estudo de caso é apresentado no Capítulo 5, por meio das definições da área de estudo e dos cenários propostos para as aplicações computacionais. Este capítulo ainda inclui análises estatísticas relativas às variáveis explicativas para as chamadas de emergências no município, baseadas em dados socioeconômicos e demográficos.

Já o Capítulo 6 expõe os resultados das aplicações computacionais do modelo proposto na forma dos cenários definidos no capítulo anterior. Nele são evidenciadas as análises cenário a cenário, possibilitadas pela utilização de ferramentas de georreferenciamento. Além disso foi realizada uma análise geral que considera, também, informações relativas ao processamento dos resultados.

O Capítulo 7 dedica-se às considerações finais do trabalho, com foco na avaliação de cumprimento dos objetivos propostos e nos principais resultados obtidos, além de considerações e recomendações para trabalhos futuros.

2 OS SERVIÇOS MÉDICOS DE EMERGÊNCIA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica referente aos serviços médicos de emergência, incluindo conceitos básicos que contribuem para a compreensão do problema estudado, e as principais características alusivas ao seu funcionamento, o que inclui suas regulamentações e procedimentos de atendimento. Diante disso, o capítulo está dividido em seis seções: (1) conceituação dos EMS; (2) características das operações de EMS; (3) medidas de desempenho comuns associadas às operações EMS; (4) Política Nacional de Atenção às Urgências; (5) variáveis explicativas para a ocorrência de chamadas de emergência; e (6) considerações finais do capítulo.

2.1 Conceituação dos *Emergency Medical Services*

Os EMS são sistemas de segurança pública que gerenciam a prestação de atendimento pré-hospitalar a pacientes em situações de urgência/emergência médica. Este tipo de atendimento compreende a estabilização da condição do paciente e seu transporte a uma unidade adequada para receber os devidos cuidados (Aboueljinane *et al.*, 2014). Tal sistema ainda é responsável pela coordenação e organização dos recursos humanos, instalações e equipamentos utilizados para a prestação de cuidados de emergência pré-hospitalar em uma determinada área geográfica (Holliman, 2010).

Inspirado no modelo irlandês de unidade móvel para cuidados coronarianos de Pantridge e Geddes (1967), os Estados Unidos implementaram, ainda na década de 1960, seu EMS, como forma de resposta às chamadas governamentais para melhoria dos resultados de atendimento à traumas (Pozner *et al.*, 2004). A partir de então, o serviço foi ampliado visando o fornecimento de cuidados essenciais para várias outras enfermidades como paradas cardíacas, infartos e acidentes vascular cerebral, além de expandir seu alcance geográfico para toda a extensão do território americano (Bray *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2013).

A evolução do sistema, no entanto, mostrou-se uma tarefa bastante árdua, principalmente quando são levadas em conta as mudanças tecnológicas pelas quais os EMS passaram nas últimas décadas. O que não passava de um serviço de transporte básico nos anos de 1960 e 1970, se tornou um sistema com sofisticadas unidades móveis de terapia intensiva ainda na década de 1980. A partir daí as ambulâncias passaram a contar com profissionais paramédicos licenciados e treinados e técnicos de emergência médica (Reines *et al.*, 1988; Blackwell e Kaufman, 2002). Além disso, mais recentemente, de acordo com

Wilde (2013), novas ferramentas como os serviços de despacho assistido por computador e a adoção de sistemas de informação geográfica em ambulâncias, possibilitaram uma redução significativa no tempo de chegada das mesmas até os pacientes.

Como imagina-se, os principais objetivos dos EMS são reduzir as taxas de mortalidade, de invalidez e o sofrimento, bem como melhorar as chances de recuperação do paciente, por meio da eficaz oferta de tratamentos às lesões que ameacem a vida (Maleki *et al.*, 2014; Aringhieri *et al.*, 2007). Para Bandara *et al.* (2014), o cumprimento destes objetivos pode estar diretamente condicionado ao emprego de apoio paramédico adequado e oportuno ao paciente em situação de emergência médica.

Por esse motivo, a velocidade de resposta das equipes que prestam este tipo de serviço é extremamente importante para o processo de salvamento pré-hospitalar. Sabendo que cada segundo desempenha um papel importante em casos de emergência, entende-se a relevância que uma rede EMS cuidadosamente projetada representa para a oferta de serviços confiáveis à população (Su *et al.*, 2015).

No entanto, a concepção dos sistemas EMS são de grande complexidade, principalmente por envolverem diversas decisões integradas em nível estratégico, tais como a quantidade e a localização das bases de despacho de ambulâncias, o número de veículos e a qual base devem ser alocados, e o sistema de despacho que deve ser utilizado. Para delinear este processo conceptivo, porém, uma questão primordial precisa ser considerada, de acordo com Ingolfsson *et al.* (2008): a cobertura fornecida pelo sistema. Como a cobertura é determinada pelo tempo de resposta às chamadas, é possível criar um objetivo de desempenho comum que indique a fração de chamadas que deve ser atendida em um determinado tempo (em minutos) ou menos, por exemplo, 90% das chamadas em menos de 9 min.

Segundo Bélanger *et al.* (2016), para que este serviço seja prestado de maneira confiável à população, os EMS precisam que sua frota de ambulâncias esteja localizada estrategicamente sobre a região de atendimento. Tal medida mostra-se fundamental frente à natureza incerta das chamadas de emergência, tanto no que se refere ao horário de chegada quanto à sua localização. Além disso, outros fatores contribuem para aumentar os níveis de incerteza da operação, como as variações da demanda ao longo do tempo (dias, semanas e meses, especialmente), a saída de veículos para atendimento de chamadas e as mudanças no tempo de viagem ao longo do dia e da rede de transporte, que muitas vezes são ocasionadas pela ocorrência de congestionamentos, comuns em grandes cidades (Nair e Miller-Hooks, 2009; Kergosien *et al.*, 2015).

Diante disso, fica claro que os sistemas EMS atuam em um ambiente cada vez mais desafiador, caracterizado pela crescente demanda, além do agravamento dos congestionamentos e de atrasos inesperados, os quais devem ser levados em conta. O alcance de um nível de serviço desejável, portanto, requer não apenas a coordenação de recursos humanos, como também uma gestão cuidadosa e eficaz dos demais recursos do sistema. Para tanto, os fornecedores do serviço de atendimento de emergências precisam tomar uma série de decisões estratégicas, sendo que as duas principais tratam: 1) quantos recursos de emergência são necessários, e entre as quais está a definição de suas frotas de ambulância; e 2) onde tais recursos devem ser localizados (Chong *et al.*, 2015; Su *et al.*, 2015).

Por esse motivo, a localização das bases e a gestão de frotas de veículos de emergência desempenha um papel tão importante na melhoria da qualidade dos serviços prestados pelas organizações públicas, que ultrapassa os EMS e atinge, entre outros, o combate à incêndios e a polícia. A localização de bases, por tratar de uma questão de cobertura, visa manter a região sob vigilância, enquanto a alocação de veículos, consiste em determinar o veículo deve ser atribuído a uma emergência, capaz de chegar até elas no melhor tempo possível (Ibri *et al.*, 2012).

Frente a isto, segundo Jagtenberg *et al.* (2015), em um mundo real onde os recursos médicos e os orçamentos apresentam limitações, os gerentes de sistemas EMS são forçados a repensar a forma como gastam ambos. Para tanto existem modelos matemáticos capazes de ajudá-los a obter mais eficiência, quando não se tratam de decisões médicas. Esses modelos também podem ser úteis na compreensão dos efeitos de uma determinada decisão, como a adição de um veículo extra, por exemplo, que seria difícil de supervisionar devido à natureza estocástica das chamadas.

No entanto, só é possível assegurar um nível de serviço adequado à população da região a que esses sistemas servem, se as organizações responsáveis por eles se mobilizarem e gerirem de maneira competente diversos recursos, como ambulâncias e equipes de trabalho. Tal tarefa torna-se ainda mais complexa frente, entre outros aspectos, à natureza incerta da origem das chamadas de emergência (Kergosien *et al.*, 2015). Assim, para Bandara *et al.* (2014), o processo de tomada de decisão para os sistemas EMS, direcionado à prestação de serviços eficazes e eficientes à população, mostra-se um desafio estratégico.

Além disso, os sistemas EMS operam sob a pressão de saber que vidas humanas podem estar diretamente em jogo. Embora nem todas as chamadas atendidas diariamente

tratem-se de emergências ou representem algum risco para a vida do paciente, do ponto de vista do público (clientes destes serviços), há uma expectativa natural de resposta eficiente a todas as chamadas. De acordo com Felder e Brinkmann (2002), como os sistemas EMS pertencem à categoria de "*option services*", ou seja, os cidadãos não utilizam este tipo de serviço com frequência conhecida, é difícil prever o momento em que as pessoas necessitarão deles, no entanto, quando isso acontecer, espera-se obter o serviço o mais rapidamente possível.

De acordo com Toro-Díaz *et al.* (2015), normalmente, a eficiência de um EMS é avaliada de duas maneiras: 1) quão rapidamente o sistema é capaz de responder as emergências; e 2) com base no número de chamadas que podem ser respondidas dentro de um determinado limite (tempo / distância). Aliado a isso tem-se que, de maneira prática, os sistemas EMS operam com a atribuição de prioridades às chamadas recebidas, ou seja, quanto maior o risco percebido, maior a prioridade da chamada. Apesar disso, como nem sempre é possível fazer tal avaliação ao telefone, o sistema propõe-se a responder às chamadas o mais rápido possível.

Como a eficiência dos sistemas de EMS pode significar, literalmente, a diferença entre a vida e a morte do paciente, a mesma é tratada como assunto de grande preocupação pública. De acordo com Mayorga *et al.* (2013), nos últimos 30 anos, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas neste sentido com o objetivo de melhorar o desempenho destes sistemas, as quais têm apontado que uma das melhores medidas de desempenho para tanto é o tempo de resposta às chamadas. Isso porque, a redução nos tempos de resposta dos sistemas EMS podem reduzir a fatalidade de um incidente de emergência (Blackwell e Kaufman, 1991), além deste mesmo fator explicar a probabilidade de sobrevivência em incidentes críticos de emergência, como os traumas (Fitzsimmons, 1973).

Observa-se que na literatura há uma correlação bem documentada entre o tempo de resposta e a probabilidade de sobrevivência do paciente. Diante disso, diversos autores destacam o tempo de resposta como uma medida vital para minimizar o impacto do incidente, especialmente em casos de maior gravidade (Stiell *et al.*, 2008; Erkut *et al.*, 2008; Kergosien *et al.*, 2015; Bandara *et al.* 2014). Para Barrachina *et al.* (2014), este tempo de atendimento é fundamental para a sobrevivência das vítimas, isso porque, verifica-se que as condições médicas da vítima se agravam com o passar do tempo entre o momento da ocorrência e a chegada da assistência médica, o que torna cada minuto fundamental na atividade de resgate.

O'Keefe *et al.* (2010) corroboram com tais afirmações quando apontam que, em casos de parada cardíaca, o efeito da redução de um minuto no tempo de resposta é capaz de aumentar em 24% a taxa de sobrevivência. Além disso, segundo Vukmir (2006), o tempo de sobrevivência dos pacientes, sem a execução precoce dos protocolos adequados para responder a uma parada cardíaca, é de aproximadamente 30 minutos.

Já quando a chamada é ocasionada por acidentes de trânsito, para Sánchez-Mangas *et al.* (2010), a probabilidade de morte diminui em um terço para uma redução de 10 minutos (de 25 para 15 minutos, por exemplo) no tempo de resposta, tanto em autoestradas quanto em rodovias convencionais. Quando os acidentes são fora do perímetro urbano, no entanto, o mesmo estudo aponta que, na Espanha, os "minutos de ouro" parecem estar entre os 25-30 minutos, o que aponta que os esforços empregados para agir neste intervalo tendem a reduzir as taxas de mortalidade.

No entanto, Barrachina *et al.* (2014) afirmam que o tempo médio para a chegada de ajuda médica, para o caso de acidentes de trânsito, não deve ultrapassar os 15 minutos para que ocorra um atendimento pré-hospitalar eficiente, de forma a não diminuir a probabilidade de sobrevivência dos feridos, nem aumentar a gravidade da lesão sofrida.

Tal correlação tem se mostrado presente na literatura a um considerável espaço de tempo, uma vez que Cretin e Willemain (1979), Eisenberg *et al.* (1979), Mayer (1979), D'Agostino e Pozen (1981) e Reines (1984) já apontavam em suas obras a relação direta entre o tempo de resposta dos veículos de resgate e a mortalidade daqueles que solicitam ajuda. Além disso, Repede e Bernardo (1994) afirmam que é justamente tal relação que torna o problema de localização da ambulância uma questão fundamental para os planejadores dos sistemas EMS. Por meio deste trabalho mostrou-se que a determinação ótima de locais de despacho de veículos era capaz de reduzir em 36% o tempo de resposta na cidade de Louisville, nos Estados Unidos.

Existem outras medidas de desempenho que podem ser utilizadas para avaliação dos sistemas EMS, como a taxa de sobrevivência e os custos (Aboueljinane *et al.*, 2013), por exemplo. No entanto, percebe-se que o maior potencial de melhoria de performance deste tipo de sistema está relacionado ao tempo de resposta e, por consequência, ao aumento da cobertura em um dado padrão de tempo (Sudtachat *et al.*, 2016).

2.2 Características das Operações de EMS

O Serviço de Atendimento Médico de Urgência (SAMU) é um dos mais antigos e conhecidos sistemas EMS do mundo. Segundo Aboueljinane *et al.* (2014), ele foi

estabelecido na França, no ano de 1968, com o intuito de coordenar a atividade dos Serviços Móveis de Emergência e Reanimação, que se tratavam de veículos de resposta a urgências com pessoal qualificado e operados por hospitais públicos. Com a criação do SAMU, tal serviço passou a ser complementado com o permanente suporte telefônico às chamadas, seguido da escolha e despacho da resposta adequada ao serviço solicitado.

Outro agente que pode estar envolvido na gestão de sistemas EMS é o Corpo de Bombeiros, a exemplo do que ocorre na cidade de Tucson, nos Estados Unidos. Neste caso, apesar de haver contato telefônico com o solicitante de socorro e o fornecimento de orientações, a prioridade do sistema é despachar uma equipe para realizar o atendimento presencial. Com isso, destaca-se a importância do tempo de resposta do serviço e estipula-se que uma equipe de paramédicos deve chegar ao local em até 8 minutos após a notificação (Goldberg *et al.*, 1990).

Em outros países, no entanto, diferentes órgãos são responsáveis pelo atendimento pré-hospitalar de emergência. Na África do Sul, por exemplo, apesar de inicialmente o atendimento pré-hospitalar de emergência ter sido fornecido pelos bombeiros em cada autoridade local, cada uma de suas nove províncias possui um Departamento de Saúde responsável pela provisão de EMS em suas respectivas áreas geográficas (Stein *et al.*, 2015). O principal objetivo dessa mudança foi melhorar o atendimento à população frente ao aumento da demanda e ao constante agravamento das situações de emergência (Seedat *et al.*, 2009; Wallis *et al.*, 2008).

Apesar das substanciais variações existentes nos sistemas EMS em diferentes países ou mesmo regiões geográficas, conceitos similares de operação são utilizados na maioria deles. A maior diferenciação entre estes sistemas consiste no envolvimento de médicos durante o processo de avaliação de chamadas de emergência e na realização de missões de resgate, verificado no SAMU francês. No entanto, o objetivo de todos eles é garantir uma assistência eficiente às vítimas, seja por telefone ou no local das ocorrências.

Com isso, segundo Aboueljinane *et al.* (2014), as operações de EMS podem ser segmentadas, basicamente, em duas etapas: as operações centrais e as operações externas. A primeira delas visa fornecer suporte telefônico ao paciente e definir a resposta mais adequada a chamada. Já a segunda tem como objetivo concretizar os cuidados pré-hospitalares aos pacientes. Essas etapas podem ser observadas de maneira resumida na Figura 2.1.

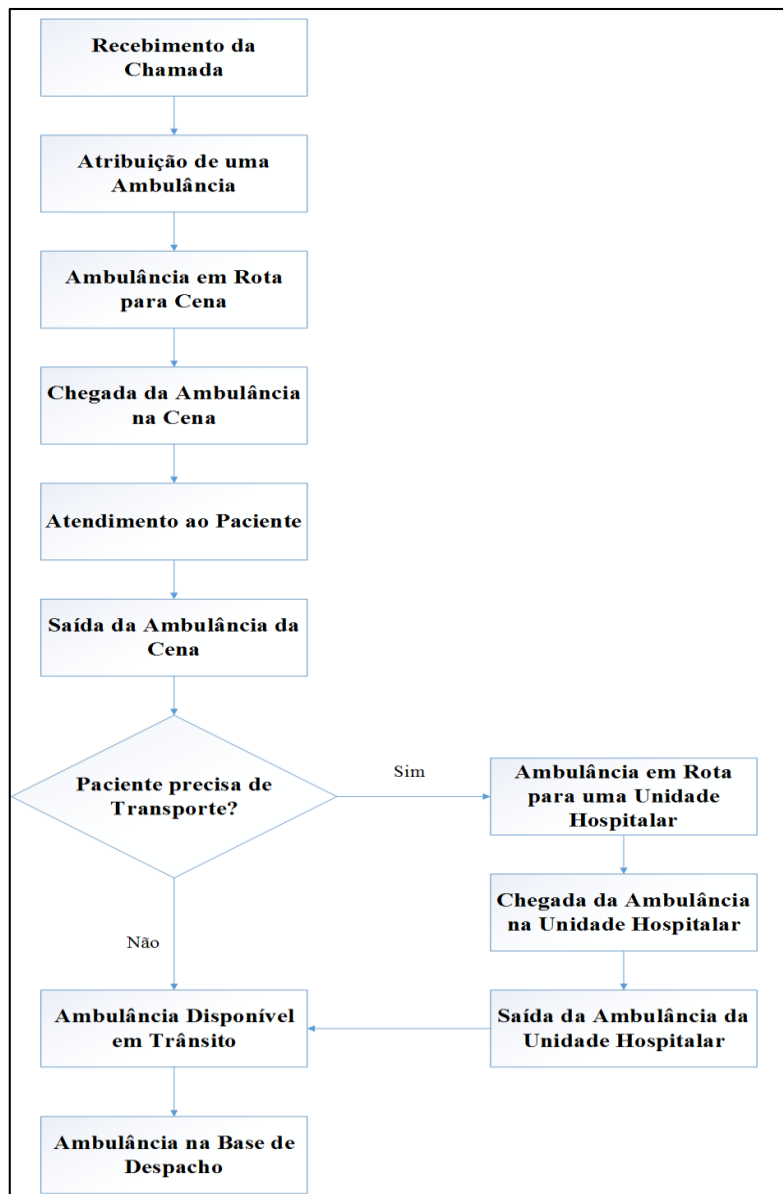


Figura 2.1 – Segmentação básica do processo de um EMS.

Fonte: Adaptado de Repede e Bernardo (1994)

As operações centrais dos EMS são realizadas em uma instalação fixa, conhecida como centro de comunicação e/ou expedição, e requerem, basicamente, dois tipos de profissionais: um operador, que faça uma seleção inicial e registre as informações relativas à natureza da solicitação; e um despachante, profissional encarregado da avaliação médica das chamadas e determinação da necessidade de envio de uma equipe de resgate (bem como a composição dessa equipe). Caso não seja necessário o envio de uma equipe, a chamada é encerrada, finalizando o atendimento. No entanto, quando verifica-se a conveniência de enviar uma equipe, o despachante é o responsável por avaliar a disponibilidade e a localização geográfica da frota. Com isso, determina-se a

equipe de resgate apropriada para envio ao local da chamada, de acordo com a regra de despacho predeterminada.

Diante do envio de uma equipe de resgate, inicia-se o trabalho das operações externas, as quais são notificadas para executar um atendimento. A partir de então, o veículo é preparado com os materiais necessários e segue para o local da ocorrência. Com a chegada da equipe, tem início o processo de estabilização do paciente, quando são utilizadas as técnicas adequadas à enfermidade registrada. O procedimento seguinte é a preparação para o transporte à unidade hospitalar de referência, caso sejam necessários cuidados médicos avançados. De acordo com Ingolfsson *et al.* (2008), o intervalo entre a notificação da equipe e a chegada ao local da chamada é conhecido como tempo de resposta do serviço. Ao fim da transferência, a equipe deve finalizar os registros de atendimento, realizar a limpeza e reabastecer a unidade de atendimento (veículo de resgate). Somente depois disso a equipe pode retornar à sua base de despacho. No entanto, deve-se destacar que, durante o trânsito de volta à base, a equipe já pode ser considerada disponível para responder a outra chamada, caso necessário.

Além disso, Aboueljiane *et al.* (2014) apontam que os sistemas EMS podem ser solicitados para diferentes tipos de atendimento, desde o resgate de vítimas até a transferência inter-hospitalar das mesmas. Os atendimentos considerados como primários estão relacionados a doenças ou lesões graves, as quais demandam assistência médica pré-hospitalar imediata, como é o caso de paradas cardíacas, traumas diversos, acidente vascular cerebral e partos, entre outros. Já os atendimentos secundários representam o transporte de pacientes de uma unidade hospitalar para outra, em casos onde a assistência médica seja necessária durante a transferência.

Diante de tamanha utilidade pública dos EMS, nas últimas décadas diversos estudos têm sido realizados com o objetivo de melhorar o planejamento e gerenciamento desses sistemas, bem como reduzir o impacto dos diversos fatores de incerteza. Isso porque, como apontado na Seção 2.1, a incerteza frente a decisão de despacho pode estar relacionada com a frequência e localização geográfica das chamadas na área de cobertura, com a capacidade disponível e com a localização precisa das equipes de resgate, entre vários outros aspectos.

2.3 Medidas de Desempenho Associadas às Operações EMS

Com o propósito de sustentar o objetivo principal dos sistemas EMS, ou seja, maximizar a probabilidade de sobrevivência dos pacientes, são utilizadas diversas

medidas de eficiência para avaliar seu próprio desempenho Sudtachat *et al.* (2014). Tal procedimento é realizado tendo em vista as condições dinâmicas em que os sistemas de serviço médico de emergência atuam. Entre os inúmeros critérios de desempenho presentes na literatura para este tipo de problema, existem três principais, os quais estão baseados na taxa de sobrevivência, nos custos do sistema e, o principal deles, no tempo de resposta.

A taxa de sobrevivência é tida como uma relevante medida de desempenho para sistemas EMS por refletir o percentual de pacientes que sobrevivem ao incidente durante um determinado período de tempo, que pode variar de acordo com o objetivo determinado (por exemplo, após o relatório do incidente, antes do tratamento definitivo, após a admissão definitiva, entre outros). No entanto, segundo Aboueljinane *et al.* (2013), percebe-se uma grande dificuldade para associar a medida quantitativa da taxa de sobrevivência a possíveis mudanças que se mostram viáveis no processo de resgate.

Já a medida de desempenho que abarca o aspecto financeiro de um sistema EMS, de acordo com Savas (1969), pode incluir os custos de capital e operacionais, com a finalidade de melhorar as métricas mencionadas. O autor indica que a realização de uma análise de custo-eficácia que compare os custos de cada alternativa com o tempo economizado, ou mesmo a melhoria da taxa de sobrevivência, é uma questão importante para atingir o objetivo pretendido ao menor custo possível. No entanto, conforme aponta Lerner *et al.* (2007), esse tipo de questão tende a ser negligenciada em função da complexidade na avaliação detalhada dos componentes de custo associados.

Quanto à medida mais utilizada, o tempo de resposta engloba desde o recebimento da chamada até a chegada da equipe ao local da ocorrência e pode ser afetado por eventuais atrasos que ocorram antes do início do deslocamento da equipe (Ingolfsson *et al.*, 2008). De acordo com Lam *et al.* (2015), além da relação com os desfechos clínicos dos pacientes, o tempo de resposta do EMS é, também, uma importante expectativa pública e uma referência de qualidade de serviço. Tal critério, como apresentado na Seção 2.1, mostra-se bastante sensível à diversas variações ao longo do dia e da área de cobertura. No entanto, dois fatores que afetam especialmente o tempo de resposta podem ser controlados pelos planejadores dos EMS: o tamanho da frota e a localização das ambulâncias dentro de sua área de serviço (Repede e Bernardo, 1994).

Diante de tamanha importância, em diversos países foram estabelecidos padrões de atendimento a emergências, em especial relativos ao tempo de resposta à chamada. Expandindo a discussão apresentada no Capítulo 1, segundo Gendreau *et al.* (2001), o

tempo de resposta em Montreal deve ser de até 10 minutos em 95% das chamadas, sendo que 70% destes pedidos deve ser atendido em menos de 7 minutos. Nos Estados Unidos, onde a Lei de EMS de 1973 estabelece que 95% das solicitações devem ser atendidas dentro de 10 minutos em áreas urbanas e dentro de 30 minutos para áreas rurais (Ball e Lin, 1993), próximo do estipulado para Montreal.

Barrachina *et al.* (2014) apontam em seu estudo que a Lei de EMS de 1973 é cumprida, apesar do volume de tráfego nas grandes cidades. Segundo tal estudo, para o parâmetro de 250 veículos/km², São Francisco e Nova York apresentam médias de 2 e 1,5 minutos de tempo de resposta dos EMS, respectivamente. Em comparação com uma capital europeia, para o mesmo parâmetro, Roma apresentou tempo de resposta de 3,5 minutos, em média.

Já em Londres, segundo Galvão *et al.* (2005), 95% das solicitações deve ter resposta dentro de 14 minutos e 50% delas em até 8 minutos. Ainda na Europa, Timm *et al.* (2014) apontam que as diferentes estratégias nacionais de emergência pré-hospitalar para pacientes gravemente feridos na Alemanha e na Holanda, resultam em um tempo de espera de até 18 minutos na Alemanha e 16,5 minutos na Holanda, bem superiores aos valores apresentados por Itália e Inglaterra. No entanto, este estudo não diferencia se o atendimento foi realizado em ambientes urbanos ou rurais.

Já em Singapura, desde 1996, com a mudança no sistema de ambulâncias, que passou a seguir o modelo norte-americano, percebe-se um aumento da preocupação com as medidas de desempenho dos sistemas EMS. Diante da evolução na operacionalização do serviço, estipulou-se a meta de 8 minutos para o tempo de resposta às chamadas (Earnest *et al.*, 2012; Ong *et al.*, 2009).

No Brasil ainda não existe uma regulamentação específica que determine o tempo de resposta para o atendimento pré-hospitalar, seja em meio urbano ou rural. Com isso, cada estado ou município tem liberdade para determinar suas próprias metas para tal medida de desempenho. Contudo, Minayo e Deslandes (2008) apontam que os tempos de resposta dos EMS em Manaus, Recife e no Rio de Janeiro, no ano de 2005, foram de 2 minutos, 15 minutos e 9 minutos, respectivamente. Já em São Paulo o tempo médio de espera por atendimento era de 8,6 minutos entre os anos de 1999 e 2003 (Malvestio, 2005).

2.4 Política Nacional de Atenção às Urgências

De acordo com Silva e Cerqueira (2012), sob a perspectiva do Ministério da Saúde, a urgência e a emergência estão entre os setores mais deficientes do sistema

brasileiro de saúde. Diante da baixa implementação de suas diretrizes de descentralização, regionalização e hierarquização, para Maciak *et al.* (2009), cria-se uma grande problemática para o Sistema Único de Saúde (SUS).

Frente a este cenário e com o intuito de aprimorar o atendimento à população, o Ministério da Saúde implementou a Política Nacional de Atenção às Urgências (PNAU) em 2003, com ênfase especial na criação do Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU) no Brasil. O principal objetivo desse conjunto de medidas era fornecer uma maior organização da rede de atenção e estruturação dos serviços, bem como a instituição de uma importante fonte de observação do SUS.

De acordo com a Política Nacional de Atenção às Urgências, sob as diretrizes da universalidade, integralidade, descentralização, humanização e participação social, a atenção às urgências deve fluir em todos os níveis do SUS, organizando a assistência desde as Unidades Básicas, Equipes de Saúde da Família até os cuidados pós-hospitalares na recuperação e reabilitação Brasil (2006).

O projeto foi iniciado pela implantação do SAMU 192 que busca, com suas unidades de Suporte Básico e Suporte Avançado de Vida, responder às necessidades da população por meio da oferta da melhor resposta ao pedido de auxílio, solicitado com o intermédio de Centrais de Regulação Médica. Durante a solicitação de socorro, o paciente ou o solicitante é induzido a fornecer informações sobre o caso de forma que o médico regulador defina qual o procedimento a ser seguido, seja uma orientação por telefone ou o deslocamento de uma equipe com os recursos necessários, específicos para a necessidade de cada paciente.

Pelo Artigo 3º da Portaria nº 1.836/GM de 29 de setembro de 2003, a PNAU deve ser instituída a partir dos seguintes componentes fundamentais:

- Adoção de estratégias promocionais de qualidade de vida, buscando identificar os determinantes e condicionantes das urgências e por meio de ações transeitoriais de responsabilidade pública, sem excluir as responsabilidades de toda a sociedade;
- Organização de redes loco-regionais de atenção integral às urgências, enquanto elos da cadeia de manutenção da vida, tecendo-as em seus diversos componentes: pré-hospitalar fixo, pré-hospitalar móvel, hospitalar e pós-hospitalar;
- Instalação e operação das Centrais de Regulação Médica das Urgências, integradas ao complexo regulador da atenção no SUS;

- Capacitação e educação continuada das equipes de saúde de todos os âmbitos da atenção; e
- Orientação geral segundo os princípios de humanização da atenção.

O início da implantação do componente móvel de urgência, possibilitado pela criação do SAMU 192, foi marcado pela Portaria nº 1864/GM, também de 2003. Segundo os preceitos do Ministério da Saúde, tal serviço deve ser desenvolvido pelas Secretarias de Estado da Saúde, em parceria com o próprio Ministério da Saúde e as Secretarias Municipais de Saúde, de forma que o mesmo seja responsável pelo componente de regulação dos atendimentos de urgência, pelo atendimento móvel de urgência da região e pelas transferências inter-hospitalares de pacientes graves.

Para tanto, o Ministério da Saúde adquire ambulâncias e os respectivos equipamentos necessários à instalação das unidades de suporte básico e avançado, e posteriormente os transfere para os estados e municípios. Os veículos são adquiridos na proporção de, ao menos, um veículo de suporte básico de vida para cada grupo de 100.000 a 150.000 habitantes e de um veículo de suporte avançado de vida para cada 400.000 a 450.000 habitantes.

A ambulância é definida como um veículo (terrestre, aéreo ou aquaviário) que se destine exclusivamente ao transporte de enfermos. Com isso, elas podem ser classificadas em:

- TIPO A – Ambulância de Transporte: veículo destinado ao transporte de pacientes que não apresentam risco de vida, para remoções simples e de caráter eletivo;
- TIPO B – Ambulância de Suporte Básico: veículo destinado ao transporte inter-hospitalar de pacientes com risco de vida conhecido e ao atendimento pré-hospitalar de pacientes com risco de vida desconhecido, não classificado com potencial de necessitar de intervenção médica no local e/ou durante transporte até o serviço de destino;
- TIPO C – Ambulância de Resgate: veículo de atendimento de urgências pré-hospitalares de pacientes vítimas de acidentes ou pacientes em locais de difícil acesso, com equipamentos de salvamento;
- TIPO D – Ambulância de Suporte Avançado: veículo destinado ao atendimento e transporte de pacientes de alto risco em emergências pré-

hospitalares e/ou de transporte inter-hospitalar que necessitam de cuidados médicos intensivos;

- TIPO E – Aeronave de Transporte Médico: aeronave de asa fixa ou rotativa utilizada para transporte inter-hospitalar de pacientes e/ou para ações de resgate; e
- TIPO F – Embarcação de Transporte Médico: veículo motorizado aquaviário, destinado ao transporte por via marítima ou fluvial.

Além destes ainda podem haver veículos de intervenção rápida, que são utilizados para transporte de médicos com equipamentos que possibilitam oferecer suporte avançado de vida nas ambulâncias do Tipo A, B, C e F.

2.5 Variáveis Explicativas para a Ocorrência de Chamadas de Emergência

De acordo com Hansagi *et al.* (2001), conhecer as características dos usuários de serviços de emergência, assim como o padrão de utilização destes serviços, mostra-se de fundamental importância para um correto planejamento e o monitoramento do sistema de saúde. Tal importância se dá em função, principalmente, da demanda excessiva característica dos serviços de emergência, fator determinante para a elevação dos custos dos sistemas de saúde, independentemente de o sistema ser público ou privado (Stein *et al.*, 2002).

Neste contexto, ferramentas estatísticas vêm sendo amplamente utilizadas, de forma a possibilitar a análise dos problemas e identificação de variáveis que contribuem para sua ocorrência. A identificação das variáveis que representam as chamadas de emergência pode contribuir não apenas para o planejamento adequado dos pontos de liberação de ambulâncias de resgate, como também para a promoção de ações de conscientização e medidas que reduzam a incidência de chamadas para casos que não necessitem, necessariamente, de um serviço de transporte de pacientes a unidades hospitalares.

Na literatura há uma vasta quantidade de estudos que apontam para a necessidade de previsão da demanda por chamadas EMS, bem como a importância de examinar a previsão de volumes de chamadas para intervalos de tempo menores e áreas geográficas pequenas (Setzler *et al.*, 2009). Tradicionalmente, o modelo de previsão de demanda se dá em função da utilização de dados históricos para diferentes áreas, onde assume-se que

a demanda futura se comportaria de maneira similar (Savas, 1969; Baker e Fitzpatrick, 1986; Ingolfsson *et al.*, 2003; Goldberg, 2004).

Aldrich *et al.* (1971) introduziram diversas variáveis socioeconômicas, entre elas sete variáveis dependentes relacionadas ao tipo de incidente (demanda total, acidentes de trânsito, outros tipos de acidentes, problemas cardíacos, envenenamentos, outras doenças e ensaios completos) e 31 variáveis independentes, nos modelos de previsão de demanda com o intuito de estimar a necessidade per capita de EMS público em Los Angeles, Califórnia.

Assim, torna-se importante avaliar os tipos de incidentes separadamente, como proposto por Aldrich *et al.* (1971), tendo em vista os diferentes fatores que podem influenciar cada um deles. Um exemplo disso são os acidentes de trânsito, os quais representam eventos inesperados que podem ser causados por diversos elementos. Neste tipo de ocorrência é comum que mais de um fator esteja envolvido, podendo ser classificados em: fatores humanos; fatores relativos ao veículo; fatores relativos à via ou ao meio ambiente (que, segundo Rocha (2015), incluem as características socioeconômicas e demográficas da região, além do uso do solo a ela atribuído); e fatores institucionais ou sociais (Gold, 1998).

Entre 1970 e 1990 vários modelos de previsão de demanda foram desenvolvidos por meio da utilização de diferentes técnicas de regressão e resultaram em previsões bastante concretas para a demanda total, em determinadas cidades. Tais resultados foram obtidos com a proposição de possíveis variáveis explicativas, seguida pelo ajuste destas variáveis, possibilitado pela análise de coeficientes estatísticos como o R^2 , por exemplo (Kvalseth e Deems, 1979; Kamenetzky *et al.*, 1982; Cadigan e Bugarin, 1989).

No estudo de Kamenetzky *et al.* (1982) foram testadas cerca de 27 variáveis e, posteriormente, a previsão de demanda por EMS foi realizada com a utilização de um modelo linear com quatro variáveis independentes: população residente; número de empregos na área; logaritmo da porcentagem da população que é branca e casada; e o quadrado do número de unidades habitacionais por área residente. Para as áreas onde os dados totais do emprego estavam disponíveis, obteve-se um R^2 ajustado de 0,92, considerado como representativo para a explicação do fenômeno.

Modelo semelhante foi aplicado para as ocorrências de resgate relacionados a acidentes de trânsito no Rio de Janeiro (Ferrari *et al.*, 2016). Das nove variáveis (sociodemográficas e ambientais) testadas, seis mostraram-se representativas na explicação das ocorrências de acidentes de trânsito com vítimas. As variáveis que se

mostraram explicativas para o fenômeno foram: população residente; número de empregos; número de estabelecimentos comerciais; comprimento de vias com velocidade entre 10 e 39 km/h; comprimento de vias com velocidade entre 40 e 60 km/h; e comprimento de vias com velocidade entre 61 e 80 km/h. Entre as possíveis variáveis explicativas, o comprimento de vias com menor velocidade permitida foi o que apresentou o maior R^2 ajustado individual, próximo de 0,67.

2.6 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas informações referentes à conceituação de serviços médicos de emergência, a nível nacional e internacional. Foi possível identificar nessa revisão os conceitos básicos de EMS, seu procedimento padrão para atendimento às chamadas de emergência, suas regulamentações e medidas de desempenho, a Política Nacional de Atenção às Urgências, além das possíveis variáveis explicativas para a ocorrência de chamadas de emergência.

No que tange ao detalhamento dos atendimentos pré-hospitalares, foram identificados aspectos relevantes para a definição dos locais de instalação das bases de despacho de veículos e dos próprios veículos em si, bem como as medidas de desempenho que regem tal planejamento como a redução do tempo de resposta, a redução da mortalidade e a redução do custo operacional, entre diversas outras.

Contudo, não foi possível identificar metodologias específicas para alcançar tais medidas de desempenho dos EMS nessa revisão bibliográfica. Diante disso, acredita-se que o planejamento deste tipo de serviço seja realizado, na maioria das vezes, de maneira empírica por pessoas de liderança do setor que se utilizam de seu conhecimento e séries históricas de registros, quando elas existem. Apesar disso, quando trata-se da localização de ambulâncias, especificamente, já há um grande embasamento metodológico estabelecido na literatura, onde diversos modelos de otimização e simulação já vêm sendo utilizadas a várias décadas.

Com isso, no próximo capítulo torna-se importante, na revisão referente aos problemas de localização de facilidades, identificar modelos e aplicações correlacionadas com o problema de pesquisa apresentado, de maneira a subsidiar o desenvolvimento da modelagem matemática proposta nessa dissertação.

3 MODELOS DE LOCALIZAÇÃO DE FACILIDADES

O presente capítulo faz uma análise dos trabalhos disponíveis na literatura científica referentes ao Problema de Localização de Facilidades (PLF), como forma de auxiliar o desenvolvimento do modelo matemático proposto neste trabalho. Para tanto este capítulo encontra-se dividido em quatro seções: (1) inicialmente, são apresentados os conceitos e a importância dos PLF, destacando suas classificações (tipos) e aplicações nas áreas pública e privada; (2) posteriormente são identificados os principais modelos matemáticos relacionados a esses problemas e suas principais características; já na seção (3) são apontadas aplicações desses modelos em EMS, utilizando modelagem matemática; e por último, (4) as considerações finais do capítulo.

3.1 Conceitos Sobre Localização de Facilidades

O Problema da Localização de Facilidades (PLF) não é novo para a comunidade de Pesquisa Operacional, no entanto, com o passar do tempo ele tem se firmado como uma das principais vertentes dessa área de estudos (Melo *et al.*, 2009; Klose e Drexler, 2005). O principal objetivo de um PLF, para Dantrakul *et al.* (2014), consiste em determinar a localização de facilidades que devem interagir com outros elementos, a fim de minimizar o custo total de instalação e de transporte entre clientes e instalações.

Os PLFs envolvem a decisão de localização para uma ou mais instalações dentro de um conjunto de locais possíveis, a fim de fornecer um alto nível de serviço aos clientes e melhorar algum critério ou objetivo que esteja sujeito a um conjunto de restrições (Irawan e Salhi, 2015; Ballou, 2006). Além disso, tais problemas também podem ser chamados de Problema de Localização-Alocação de Facilidades (Lorena *et al.*, 2001), quando além de localizar a facilidade, faz-se necessário alocá-la aos clientes que devem ser servidos. Com isso, segundo Melo *et al.* (2009), surgem algumas perguntas que devem ser respondidas pelos PLFs: (i) Quais facilidades devem ser abertas/utilizadas? (ii) Quais clientes devem ser atendidos a partir de qual facilidade, de forma a melhorar um dado critério?

Arakaki (2003) salienta que os PLFs podem ser identificados em redes, compostas por pontos (nós ou vértices) e linhas (arcos ou arestas), os quais são capazes de descrever de forma natural vias públicas, conexões de água, energia, telefonia, entre outros elementos. Os pontos podem representar as facilidades (fábricas, depósitos, antenas,

unidades de saúde, escolas e outros) e os clientes que devem ser atendidos por elas, enquanto as linhas reproduzem a conexão entre eles.

De acordo com Owen e Daskin (1988), a decisão de localização de instalações faz parte do planejamento estratégico de longo prazo de uma organização, seja ela pública ou privada, na qual se faz necessário satisfazer múltiplos objetivos, estabelecidos a partir de critérios quantitativos e qualitativos. As maiores vantagens associadas à localização de uma instalação vão além da redução do custo de transporte, pois influenciam diretamente na melhora do desempenho do negócio, além de aumentar a competitividade e a rentabilidade das empresas, caso das instituições privadas (Chuang, 2001).

Com isso, Romero (2006) destacou alguns itens que podem ser elencados como critérios de grande relevância no processo de localização de facilidades, a saber:

- Área para implantação – custo da área, disponibilidade de espaço necessário e custos associados à construção da instalação;
- Utilidades públicas – disponibilidade e custos de fornecimento de água, energia e telecomunicações, entre outros;
- Acessibilidade: disponibilidade e custo de acesso da mão de obra e de transporte dos produtos, distância entre o local potencial e os fornecedores e clientes, rotas de acesso e qualidade dos serviços de transporte na região;
- Matéria-prima – disponibilidade e custos de insumos nas regiões próximas de cada local potencial;
- Questões mercadológicas – proximidade com o mercado consumidor do serviço oferecido pela facilidade, atratividade local e análise de competitividade, com considerações sobre a concorrência;
- Aspectos ambientais – conformidade com a legislação, obtenção de licenças, políticas de controle e preservação do meio ambiente da região;
- Aspectos físicos – características geográficas e topológicas do local e clima e temperatura, entre outros aspectos;
- Ocupação urbana – cidades próximas, população, condições de uso do solo e impactos sociais gerados;
- Recursos humanos – legislação trabalhista, disponibilidade e custo de mão de obra qualificada;
- Qualidade de vida – infraestrutura social, custo de vida e disponibilidade de serviços e lazer;

- Impostos e taxas – valores e estabilidade da política de impostos;
- Incentivos fiscais e tributários; e
- Governo – presença de agências reguladoras e estabilidade das políticas de governo.

Quanto às aplicações de PLF, percebe-se que elas ocorrem tanto no setor privado quanto no público, uma vez que podem possuir diferentes objetivos como reduzir custos de transporte, maximizar a área de cobertura, aumentar o nível de acessibilidade da demanda ou reduzir os custos com instalações (Mapa e Lima, 2012). Tais aplicabilidades também podem ser vistas nas mais diversas áreas: logística de distribuição e integração modal (Jia *et al.*, 2007; Costa *et al.*, 2008; Alumur *et al.*, 2012; Gelareh *et al.*, 2015); localização de centrais de ambulâncias (Brotcorne *et al.*, 2003; Yin e Mu, 2012; Chanta *et al.*, 2014; Ansari *et al.*, 2015); serviços públicos (Ndiave e Alfares, 2008; Li *et al.*, 2011), localização de centros de coleta de resíduos (Ferri *et al.*, 2015); e engenharia de tráfego (Camara *et al.*, 2016), entre outros.

3.2 Principais Modelos Presentes na Literatura e suas Características

Segundo Ballou (2006), os modelos de otimização são baseados em procedimentos matemáticos precisos com o objetivo de avaliar alternativas e garantir que a solução ótima, ou a melhor possível, seja encontrada para o problema. Diante disto é possível observar um crescente número de modelos matemáticos, criados a fim de lidar com a pluralidade de aplicações encontradas para os PLFs. Klose e Drexl (2005) destacam que tais modelos abrangem formulações que variam em complexidade desde modelos simples lineares, monocelulares, não capacitados e determinísticos até modelos probabilísticos não-lineares.

Quanto à taxonomia dos PLFs, Camara (2016) aponta que diversos autores apresentam diferentes formas de classificação, no entanto, na maioria das vezes tais classificações são complementares. As mais comumente apontadas em trabalhos científicos são as classificações de Brandeau e Chiu (1989) e Krarup e Pruzan (1990) que indicam que os PLFs podem ser agrupados nos seguintes modelos: Planares ou Contínuos; Discretos; Único e Multi Produtos; Estáticos e Dinâmicos; Determinísticos e Estocásticos; Mono e Multi Objetivo; e Capacitados e Não-Capacitados (veja Quadro 3.1).

Quadro 3.1 – Taxonomia dos PLFs

Modelos	Descrição
Planares ou Contínuos	Nos modelos planares os componentes dos PLFs, as facilidades e pontos de demanda, podem ser representados em um espaço contínuo, ou seja, em qualquer lugar do plano.
Discretos	Os modelos discretos são mais comumente encontrados na literatura. Nestes casos, as facilidades e os pontos de demanda são representados espacialmente por meio de uma rede, também conhecida como grafo. Essas redes são compostas por vértices, que representam as facilidades e pontos de demanda, e arestas que representam as conexões entre eles.
Único e Multi Produtos	Na maioria dos casos, os PLFs indicam que uma facilidade atende à um único produto ou fornecem um único serviço de atendimento. Contudo, em modelos com multiprodutos, os pontos de demanda, ou clientes, podem necessitar de diferentes produtos ou serviços das facilidades.
Estáticos e Dinâmicos	Nos modelos Estáticos, os dados que representam os PLFs não são dependentes do tempo. Em contrapartida, nos Dinâmicos, os dados são dependentes da variável tempo. Nesse caso, os PLFs podem ser utilizados no planejamento, indicando, inclusive, o momento de fechamento de algumas facilidades.
Determinísticos e Estocásticos	Nos modelos denominados determinísticos, parâmetros relacionados aos PLFs, tais como a localização e demanda dos clientes, são conhecidos. No caso dos modelos estocásticos, esses parâmetros são representados de forma probabilística.
Mono e Multi Objetivos	No caso dos PLFs multiobjetivo, é desejável que diferentes funções objetivo sejam otimizadas simultaneamente. Nesse caso, por exemplo, pode-se buscar a minimização de custos e maximização de cobertura, normalmente conflitantes.
Capacitados e Não-Capacitados	Nos modelos capacitados, as facilidades possuem capacidade limitada, ou faixas de capacidade, para atendimento dos pontos demandadores. No entanto, as facilidades podem também ser representadas com capacidade ilimitada, ou pelo menos, suficientemente grande para atendimento de toda a demanda.

Fonte: Camara (2016)

Quanto às formulações matemáticas utilizadas, os PLFs podem ser classificados, principalmente, em três grupos: (1) Modelos de Cobertura, que garantem a cobertura (atendimento) dos centros de demanda de determinada região dentro de um padrão pré-definido; (2) Modelos p -Medianas, que minimizam o custo total da distribuição, o que reduz a distância do serviço aos pontos de demanda; e (3) Modelos p -Center, que visam minimizar a maior distância de uma facilidade a um ponto de demanda (Crainic e Laporte, 1997; Mladenović *et al.*, 2003; Senne *et al.*, 2005; Chaves *et al.*, 2007; Diaz e Fernandez, 2006).

Nos subitens a seguir são apresentadas as formulações matemáticas referentes aos três principais modelos apresentados (modelos de Cobertura, p -Medianas e p -Center). Sendo assim, considere: J como o conjunto que representa os potenciais locais para receber uma dada facilidade; e I como o conjunto que representa todos os pontos que demandam atendimento, ou seja, o serviço prestado por essas facilidades.

3.2.1 Modelos de Cobertura

A ideia central dos modelos de cobertura consiste em localizar facilidades com o intuito de garantir a cobertura de determinada região (Romero, 2006). Para tanto, tais problemas buscam encontrar o número mínimo de instalações que cubram todos os clientes, ou ainda maximizar o número de clientes abrangidos por determinado número de instalações abertas (Dantrakul *et al.*, 2014).

Eles são tidos como os modelos de localização mais populares, devido a sua ampla aplicabilidade real, especialmente quando se tratam de serviços e instalações de emergência. Existem, basicamente, duas formas de abordar tal problema: (i) quando o cliente deve ser atendido por pelo menos uma instalação dentro de uma dada distância crítica (não necessariamente a instalação mais próxima); e (ii) quando o cliente recebe o serviço por instalação dependendo da distância entre o cliente e as instalações, ou seja, a mais próxima possível dentro de um valor pré-definido (Farahani *et al.*, 2012). Segundo Fallah *et al.* (2009), tal valor crítico pré-definido é conhecido como distância de cobertura ou raio de cobertura.

As primeiras referências sobre o problema de localização de cobertura na literatura são encontradas em Berge (1957) e Hakimi (1965), no entanto, sua primeira formulação matemática foi proposta por Toregas *et al.* (1971). Sob a ótica do conceito de cobertura, que neste caso, está relacionada aos pontos de demanda que cada uma das facilidades consegue atender, tem-se que um ponto de demanda $i \in I$ é dito coberto por uma facilidade $j \in J$, se ela estiver disponível para atendê-lo. O modelo inicial considera que:

- S – maior distância de serviço aceitável;
- d_{ij} – distância entre o nó de demanda i e a facilidade j ;
- N_i – conjunto de localizações potenciais dentro de S de modo que $N_i = \{j | d_{ij} \leq S\}$; e
- x_j – variável de decisão binária que recebe 1 se uma facilidade for aberta no local $j \in J$ e, 0 caso contrário.

Assim, o modelo matemático que representa o problema de cobertura geral é apresentado a seguir. A Função Objetivo (3.1) busca minimizar o número total de facilidades localizadas.

$$\text{Minimizar } z = \sum_{j \in J} x_j \quad (3.1)$$

As Restrições (3.2) mostram o serviço requerido pela demanda de todos os pontos de demanda $i \in I$.

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (3.2)$$

As Restrições (3.3) garantem que as variáveis de decisão do modelo matemático são binárias.

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.3)$$

No entanto, apesar da formulação geral proposta por Toregas *et al.* (1971), Schilling *et al.* (1993) apontam que os modelos de cobertura podem ser classificados em duas categorias: (1) *Location Set Covering Problem* (LSCP), também conhecidos como problema de cobertura de conjuntos; e (2) *Maximal Covering Location Problem* (MCLP) (Church e ReVelle, 1974), ou problema de localização de máxima cobertura. Para definir tais categoria, os autores utilizaram como base a estrutura topológica, a natureza da demanda, as características da facilidade a ser localizada e a aplicação em setores públicos ou privados.

Para Farahani *et al.* (2012), o problema de cobertura de conjunto tenta minimizar o custo de localização que satisfaz um nível de cobertura especificado. De maneira análoga à formulação geral, denomina-se como cobertura de uma facilidade $j \in J$, o conjunto de pontos de demanda que esta facilidade pode atender. Sendo assim, para cada ponto de demanda $i \in I$ existe um subconjunto de $j \in J$, denominado N_j , que representa as facilidades que podem atender ao ponto i .

. Dessa forma, para este modelo, considera-se que:

- a_{ij} – parâmetro do modelo que, recebe 1 se uma facilidade $j \in J$ pode atender a um ponto de demanda $i \in I$ e, 0 caso contrário;
- f_j – custo de abertura de uma facilidade na localização $j \in J$; e
- x_j – variável de decisão binária que, recebe 1 se uma facilidade for aberta no local $j \in J$ e, 0 caso contrário.

Assim, o modelo matemático que representa o LSCP é apresentado a seguir. A Função Objetivo (3.4) busca minimizar o custo total de abertura das facilidades.

$$\text{Minimizar } \sum_{j \in J} f_j x_j \quad (3.4)$$

As Restrições (3.5) garantem que todos os pontos de demanda $i \in I$ devem ser atendidos por pelo menos uma facilidade, e ainda, que o ponto de demanda será atendido por uma facilidade cuja cobertura inclui o referido ponto de demanda.

$$\sum_{j \in J} a_{ij} x_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (3.5)$$

As Restrições (3.6) garantem que as variáveis de decisão do modelo matemático são binárias.

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.6)$$

Para muitas aplicações práticas, no entanto, os recursos alocados podem não ser suficientes para cobrir todas as demandas existentes com o nível de cobertura desejado. Sendo assim, surge o MCLP, que tem como característica principal a busca pelo atendimento da maior demanda possível.

De acordo com Arakaki (2003), o MCLP busca a cobertura da demanda e tem como critério de determinação dessa cobertura a localização do ponto de demanda em relação à pelo menos uma facilidade. Com isso, um ponto de demanda é considerado coberto se o mesmo estiver menos distante de pelo menos uma facilidade do que uma distância crítica S pré-determinada. Caso a distância entre o ponto de demanda e a facilidade seja maior que S , tal demanda é considerada não coberta. Sendo assim, pode afirmar que o MCLP não apresenta restrições de capacidade e não exige que todas as áreas de demanda sejam cobertas.

Sabendo ainda que neste tipo de problema também prevalecem o conceito de cobertura e o número fixo de facilidades que podem ser abertas, os seguintes elementos devem ser considerados para fins de modelagem matemática:

- a_{ij} – parâmetro do modelo que, recebe 1 se uma facilidade $j \in J$ pode atender a um ponto de demanda $i \in I$ e, 0 caso contrário;
- h_i – quantidade demandada (ou população) do ponto $i \in I$;
- p – quantidade de facilidades que deseja-se instalar, abrir ou localizar;
- X_j – variável de decisão, conforme descrito anteriormente nesta seção; e
- Z_i – variável de decisão que, recebe 1 se o ponto de demanda é atendido e, 0 caso contrário.

A formulação matemática do MCLP proposta por Church e ReVelle (1974) está descrita a seguir. A Função Objetivo (3.7) busca maximizar a quantidade de pontos de demanda atendidos pelas facilidades abertas.

$$\text{Maximizar } \sum_{i \in I} h_i Z_i \quad (3.7)$$

As Restrições (3.8) garantem que um ponto de demanda $i \in I$ só pode ser atendido por uma facilidade $j \in J$ que seja aberta e cuja cobertura atenda ao local de demanda. Nesse caso, o parâmetro a_{ij} é o responsável por garantir que as coberturas sejam respeitadas.

$$Z_i \leq \sum_{j \in J} a_{ij} X_j \quad \forall i \in I \quad (3.8)$$

As Restrições (3.9) garantem que a quantidade máxima de facilidades abertas seja respeitada. A quantidade de facilidades deve ser menor ou igual a p .

$$\sum_{j \in J} X_j \leq p \quad (3.9)$$

As Restrições (3.10) e (3.11) garantem que as variáveis de decisão do modelo são do tipo binárias.

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.10)$$

$$Z_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (3.11)$$

Com essa nova configuração de modelo de cobertura, o MCLP ampliou a gama de aplicações possíveis que envolvam a localização de facilidades. Entre as principais delas pode-se citar: o planejamento de redes de ambulâncias (Hamon *et al.*, 1979; Eaton *et al.*, 1986; Adenso-Díaz e Rodríguez, 1997); a localização de sirenes de aviso (Current e O’Kelly, 1992); e a seleção de áreas prioritárias para conservação (Woodhouse *et al.*, 2000), entre diversas outras.

3.2.2 Modelo p -Medianas

É comum observar que uma demanda é atribuída à facilidade aberta mais próxima dela, no entanto, segundo ReVelle *et al.* (2008), quando são levadas em conta as capacidades, economias de escala ou outras restrições, pode ser que as demandas sejam atribuídas a instalações mais remotas sem prejuízos. Além disso, em determinados casos, nada impede que as demandas sejam divididas entre diferentes facilidades em busca da solução ideal para seus problemas. Nessas lacunas tem se fortalecido os problemas de p -Medianas.

O problema de localização de p -Medianas, proposto inicialmente por Hakimi (1964), consiste em localizar p facilidades (medianas) entre n locais potenciais, de maneira que o somatório das distâncias entre os pontos de demanda e a facilidade mais próxima seja minimizada (Dantrakul *et al.*, 2014; Rebreyend *et al.*, 2015). Segundo Irawan *et al.* (2014), o problema pode se tornar condicional quando já existem facilidades na área de estudo e o objetivo é localizar novas instalações. Com isso, um cliente pode ser servido por facilidades existentes ou novas.

A formulação matemática do problema p -Medianas pode ser descrita conforme Senne *et al.* (2005). Para este modelo, considera-se que:

- d_{ij} – distância entre o ponto de demanda $i \in I$ e a facilidade $j \in J$. Esta distância pode representar a distância Euclidiana entre os pontos i e j , ou a distância rodoviária, conforme necessidade e aplicação do modelo;
- p – quantidade de facilidades que deseja-se instalar, abrir, ou localizar;
- x_{ij} – variável de decisão binária que, recebe 1 caso a facilidade $j \in J$ seja alocada (ou designada) para atender ao ponto de demanda $i \in I$ e, 0 caso contrário; e
- y_j – variável de decisão binária que recebe 1 caso a localização $j \in J$ seja escolhida para receber uma facilidade e, 0 caso contrário.

Para este tipo de problema a Função Objetivo (3.12) busca minimizar a distância total entre cada uma das facilidades e os pontos de demanda que estas são designadas para atender. Como a distância é considerada uma impedância entre os pontos de demanda e da facilidade, a mesma pode ser representada pelo custo monetário, tempo, ou outros parâmetros.

$$\text{Minimizar } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} x_{ij} \quad (3.12)$$

As Restrições (3.13) garantem que todos os pontos de demanda $i \in I$ devem ser atendidos por apenas uma facilidade $j \in J$.

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.13)$$

De maneira complementar às Restrições (3.13), é necessário garantir que um ponto de demanda $i \in I$ só seja atendido por uma facilidade $j \in J$ se esta for aberta (Restrições 3.14).

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.14)$$

As Restrições (3.15) garantem que p facilidades serão abertas.

$$\sum_{j \in J} y_j = p \quad (3.15)$$

Por último, as Restrições (3.16) e (3.17) garantem que todas as variáveis de decisão do modelo matemático são binárias.

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.16)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.17)$$

Irawan *et al.* (2014) afirmam que algumas aplicações dos problemas de p -Mediana podem envolver um grande número de pontos de demanda e de potenciais locais de facilidades. Diante de tais situações, a resolução desses problemas tende a ser bastante prejudicada e pode atingir elevados tempos computacionais, comprometendo a obtenção da

solução ótima (Francis *et al.*, 2009). Com o intuito de resolver outros problemas práticos de p -Medianas, surgiram os problemas de p -Medianas Capacitados que passaram a considerar que cada ponto $i \in I$ possui uma demanda q_i e que cada uma das facilidades $j \in J$ possui uma capacidade máxima de atendimento Q_j (Lorena e Senne, 2004; Yaghini *et al.*, 2013).

O problema de p -Medianas Capacitado pode ser descrito por meio da Função Objetivo (3.12) e das Restrições (3.13) – (3.17), com adição das Restrições (3.18) que garantem que a demanda total dos pontos $i \in I$ atendidos por uma facilidade $j \in J$ deve ser menor ou igual à sua capacidade máxima.

$$\sum_{j \in J} q_i x_{ij} \leq Q_j y_j \quad \forall i \in I \quad (3.18)$$

3.2.3 Modelo p -Center

O problema de cobertura de conjunto mostra-se inviável para aplicação em muitos contextos práticos, visto que determina o número mínimo de instalações necessárias para cobrir todas as demandas utilizando uma conhecida distância de cobertura. Além do MCLP, outra classe de problema é capaz de solucionar tal inviabilidade, os problemas de p -Center (Owen e Daskin, 1998). O problema de localização do tipo p -Center consiste em localizar p facilidades, que devem ser alocadas aos pontos de demanda, de maneira a minimizar a máxima distância entre cada ponto de demanda e a facilidade que o atende (Suzuki e Drezner, 1996; Dantrakul *et al.*, 2014).

Também conhecido como problema *Minimax*, segundo Tansel *et al.* (1983), pode-se considerar também que o objetivo do modelo seja a minimização da máxima perda para fornecimento de um bem ou serviço, por uma facilidade.

Para a formulação matemática deste modelo, deve-se considerar que:

- W – máxima distância entre um ponto de demanda $i \in I$ e a facilidade no local $j \in J$ mais próxima deste;
- Y_{ij} – fração da demanda de um ponto $i \in I$ atendido por uma facilidade na localização $j \in J$;
- d_{ij} – distância entre um ponto de demanda $i \in I$ e uma facilidade no local $j \in J$;
- p – quantidade de facilidades que devem ser abertas; e

- X_j – variável de decisão que, recebe 1 caso uma facilidade seja aberta no local $j \in J$ e, 0 caso contrário;

Dessa forma, o modelo matemático geral de p -Center é apresentado a seguir, conforme Hakimi (1964). A Função Objetivo (3.19) busca minimizar a máxima distância entre um ponto de demanda e a facilidade mais próxima que o atende.

$$\text{Minimizar } W \quad (3.19)$$

As Restrições (3.20) garantem que cada ponto de demanda deve ser completamente atendido. Nesse caso o somatório das frações de atendimento deve ser igual a 1.

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.20)$$

As Restrições (3.21) garantem que p facilidades serão abertas.

$$\sum_{j \in J} X_j = p \quad (3.21)$$

As Restrições (3.22) garantem que a demanda de um ponto $i \in I$ só pode ser atendida por uma facilidade $j \in J$ se esta estiver aberta.

$$Y_{ij} \leq X_j \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.22)$$

As Restrições (3.23) garantem que a máxima distância entre um ponto de demanda $i \in I$ e a facilidade de atendimento mais próxima deve ser maior que a distância entre qualquer outro ponto de demanda e a facilidade que o atende.

$$W \geq \sum_{j \in J} d_{ij} Y_{ij} \quad \forall i \in I \quad (3.23)$$

As Restrições (3.24) garantem que a variável de decisão $X_j, \forall j \in J$, seja binária e as Restrições (3.25) garantem que as variáveis de decisão envolvidas são pertencentes ao conjunto dos números reais positivos (\mathbb{R}^+).

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.24)$$

$$Y_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.25)$$

3.3 Aplicação de Modelos de Localização de Facilidades em Serviços Médicos de Emergência

Historicamente tem-se percebido o aumento da demanda por serviços médicos de emergência, especialmente em função do crescimento populacional registrado em todo o mundo. Diante disso, mostra-se cada vez mais necessária a utilização de ferramentas que apoiem o planejamento dos sistemas EMS, de forma a obter melhoras de desempenho, por meio da melhor utilização dos recursos e da prestação de serviço eficiente e eficaz aos clientes (Bandara e Mayorga, 2012).

Schneeberger *et al.* (2016) apontam que os serviços médicos de emergência têm recebido especial atenção de pesquisadores devido à grande importância do seu tempo de resposta e da disponibilidade de veículos para a configuração do sistema. Somando-se a isso, os limitados recursos dos governos, tanto financeiros quanto operacionais, dificultam que sejam satisfeitas as necessidades da população quanto aos atendimentos de emergência. Assim, a alocação ótima de recursos se torna uma questão importante, com muitos métodos de solução possíveis publicados.

De acordo com Drezner (1995), observa-se duas questões fundamentais quando o objetivo é a melhoria de desempenho dos EMS: (i) como dimensionar a quantidade de bases operacionais e de veículos de resgate necessários para que toda a população seja atendida?; e (ii) qual a disposição (localização das bases) ideal deste sistema de forma que o tempo de resposta seja adequado para atendimento à população? Para Su *et al.* (2015), tais questões se enquadram na categoria geral de problemas de localização de facilidades adaptados à realidade dos atendimentos de emergência.

Há uma vasta literatura que abrange o planejamento eficiente dos sistemas EMS, principalmente em busca da maximização da cobertura e da minimização do tempo médio de resposta do sistema. Segundo Toro-Díaz *et al.* (2014), apesar da abordagem comum por técnicas de modelagem, existem duas correntes de trabalho reconhecidas: (1) a modelagem

descritiva, que reproduz o desempenho do sistema, dadas as suas características, representada por modelos de Teoria de Filas e Simulação; e (2) a modelagem normativa, que busca o melhor conjunto de decisões a partir de uma determinada função objetivo.

A localização de componentes de sistemas EMS (sejam eles veículos de resgate ou bases operacionais) tem sido abordada na literatura desde a década de 1960. Segundo Shariat-Mohaymany *et al.* (2012), modelos de localização discreta são desenvolvidos rotineiramente com diversos objetivos como a diminuição do custo dos sistemas EMS, a minimização do número de veículos de emergência e/ou bases operacionais e a maximização da cobertura do serviço frente a um número pré-determinado de ambulâncias e/ou bases, entre outros.

O primeiro modelo de cobertura de localização aplicado à localização de emergências disponível na literatura foi o Problema de Cobertura de Conjunto de Locais, também conhecido como LSCP, proposto por Toregas *et al.* (1971). O LSCP é um modelo de cobertura que tem como objetivo localizar o menor número possível de instalações que cubra todos os pontos de demanda. Segundo Schneeberger *et al.* (2016), tal modelo fornece a embasamento para a maioria de modelos subsequentes encontrados na literatura, no entanto, a cobertura total não é facilmente alcançada na realidade devido à grande limitação de recursos. Com isso, um ponto de demanda distante dos outros, dificilmente será coberto dentro do padrão de distância (ou de tempo) predefinido.

Church e ReVelle (1974) utilizaram o primeiro modelo de máxima cobertura determinista, o MCLP, o qual limita a quantidade de localizações de veículo. Sendo assim, dado um padrão de cobertura para um serviço, que pode incluir uma distância máxima ou um determinado tempo de viagem, o objetivo do modelo é localizar um número limitado de facilidades que maximizem a cobertura dos pontos de demanda. Para Yin e Mu (2012), o MCLP tem se mostrado uma ferramenta poderosa e amplamente utilizada em diversos processos de planejamento para distribuir de maneira otimizada recursos limitados com o intuito de maximizar benefícios sociais e econômicos.

No entanto, de acordo com Li *et al.* (2011) o LSCP e MCLP possuem uma deficiência comum: quando um veículo de resgate é chamado para o serviço, os pontos de demanda sob sua cobertura ficam temporariamente descobertos por ela, ou seja, caso uma nova chamada fosse registrada na mesma área, não haveria veículo disponível para atendimento. Posteriormente foram propostos na literatura duas vertentes de pesquisa que superam tal inconveniente: os modelos de múltipla cobertura; e os modelos de probabilidades e confiabilidade das instalações.

Os modelos de múltipla cobertura, como o *Double Standard Model* (DSM), proposto por Gendreau *et al.* (1997), tem como objetivo maximizar cobertura da demanda

com, pelo menos, dois veículos, onde se fornece cobertura completa dentro de um padrão de longa distância e maximiza-se a cobertura dentro de um padrão de distância mais curta. Tais modelos, além de não limitar a demanda que um veículo pode cobrir, disponibilizam a formulação de um único período, o que aumenta a possibilidade de não cobertura de pacientes em regiões densamente povoadas.

Doerner *et al.* (2005) estenderam o modelo de Gendreau *et al.* (1997) a uma versão capacitada, onde um único veículo é capaz de cobrir uma quantidade específica de demanda por período. Schmid e Doerner (2010) também ofereceram melhorias ao problema, propondo o *multi-period Double Standard Model* (mDSM) para explicar o aumento significativo nos tempos de viagem durante as horas de ponta. Com as mudanças no tempo de viagem tornou-se necessário reposicionar os veículos, de forma a manter um elevado nível de cobertura. Esses autores resolveram o problema heurísticamente, por meio de um método de busca baseado em vizinhança variável.

Já os modelos de probabilidades e confiabilidade das instalações são representados pelo Problema de Localização de Máxima Cobertura Esperada ou *Maximum Expected Covering Location Problem* (MEXCLP) proposto por Daskin (1983) e pelo Problema de Localização de Máxima Disponibilidade ou *Maximum Availability Location Problem* (MALP) apresentado por ReVelle e Hogan (1989). Na formulação do MEXCLP, supõem-se que as facilidades são independentes e a probabilidade de ocupação seja a mesma para todas as facilidades. Diante disso, tais formulações são relaxadas em modelos hipercubo de filas, que fornecem uma representação mais fiel de sistemas reais (Li *et al.*, 2011). Tais modelos serviram como base para o *Multi-period Maximum Expected Coverage Location Problem* (TIMEXCLP) proposto por Repede e Bernardo (1994) e para a variação deste modelo multiperíodo proposto para ambientes dinâmicos (Rajagopalan *et al.*, 2008).

Para Schneeberger *et al.* (2016), o avanço das tecnologias de informação contribui de maneira ímpar para o suporte de sistemas com dados dinâmicos, de tal forma que os modelos de alocação dinâmica mostram-se capazes de resolver problemas de localização e alocação em tempo real. Pode-se verificar a utilização de tais técnicas no *Dynamic Double Standard Model* (DDSM) proposto por Gendreau *et al.* (2001), entre diversos outros modelos presentes na literatura.

A Tabela 3.1 apresenta um breve resumo dos principais modelos de localização de facilidades aplicados aos problemas de emergência encontrados na literatura. Não foram feitas distinções quanto às características dos modelos ou técnicas de solução utilizadas.

Tabela 3.1 – Resumo dos modelos de localização de facilidade de emergência

Referência	Modelo	Objetivo
Toregas <i>et al.</i> (1971)	LSCM	Minimizar o número de ambulâncias
Church e ReVelle (1974)	MCLP	Maximizar a demanda coberta
Schilling <i>et al.</i> (1979)	TEAM	Maximizar a demanda coberta
Schilling <i>et al.</i> (1979)	FLEET	Maximizar a demanda coberta
Daskin e Stern (1981)	Modificações do MCPL	Maximizar a demanda coberta e o número de pontos de demanda coberto mais de uma vez
Daskin (1983)	MEXCLP	Maximizar a cobertura da demanda esperada
Hogan e ReVelle (1986)	Modificações do MCPL	Maximizar a demanda coberta duas vezes ou uma combinação da demanda coberto uma ou duas vezes
ReVelle e Hogan (1989)	MALP I	Maximizar a cobertura total da demanda com uma probabilidade α
ReVelle e Hogan (1989)	MALP II	Maximizar a cobertura total da demanda com uma probabilidade de pelo menos α
Batta <i>et al.</i> (1989)	AMEXCLP	Maximizar a cobertura da demanda esperada
Goldberg <i>et al.</i> (1990)	MEXCLP ajustado	Maximizar a cobertura da demanda esperada dentro de 8 minutos
Ball e Lin (1993)	Modificações do LSCM (Rel-P)	Minimizar os custos fixos das ambulâncias
Repede e Bernardo (1994)	TIMEXCLP	Maximizar a cobertura da demanda esperada
Marianov e ReVelle (1994)	QRLSCP	Maximizar a cobertura total da demanda com uma probabilidade de pelo menos α
Galvão e ReVelle (1996)	MCLP	Maximizar a demanda coberta
Adenso-Diaz e Rodriguez (1997)	MCLP	Maximizar a cobertura e minimizar os custos
Gendreau <i>et al.</i> (1997)	DSM	Maximizar a demanda coberta pelo menos duas vezes dentro de um $r1$
Mandell (1998)	TTM	Maximizar a demanda total esperada
Gendreau <i>et al.</i> (2001)	DDSM	Maximizar dinamicamente a demanda coberta pelo menos duas vezes dentro de $r1$, menos uma penalidade de redistribuição
Aickelin (2002)	LSCP	Minimizar o custo da localização
Aytug e Saydam (2002)	MEXCLP	Maximizar a cobertura da demanda esperada
Karasakal e Karasakal (2004)	MCLP com cobertura parcial	Maximizar a cobertura dos pontos de demanda e determinar os locais de instalação selecionados
Doerner <i>et al.</i> (2005)	DSM com penalidade na FO	Maximizar a demanda coberta duas vezes em um raio menor e a demanda coberta pelo menos uma vez em um raio maior
Galvão <i>et al.</i> (2005)	Extensões do MEXCLP e MALP	Maximizar a cobertura da demanda esperada
Alsalloum e Rand (2006)	Extensão do MCPL	Maximizar a cobertura da demanda em um tempo pré-determinado
Jia <i>et al.</i> (2007)	MCLP com múltiplas quantidades	Maximizar as demandas cobertas por quantidade suficiente de instalações em distâncias diferentes
Rajagopalan <i>et al.</i> (2008)	DACL	Determinar o número de mínimo de ambulâncias que garanta um padrão de cobertura em um tempo pré-determinado
Yin e Mu (2012)	MCMCLP	Maximizar a cobertura da demanda e minimizar a distância entre as demandas alocadas e às bases de despacho a elas atribuídas

Jia *et al.* (2007) afirmam, ainda, que a eficácia de uma decisão de localizar e/ou alocar recursos de serviços de emergência pode ser avaliada de diversas formas, inclusive

pelo total de capital e custos operacionais envolvidos, pela cobertura da demanda de incidentes e pela resposta a tais incidentes. A categorização dos modelos matemáticos, então, depende de como as considerações das avaliações são modeladas (como um objetivo ou como uma restrição). Além disso, de acordo com Toro-Díaz *et al.* (2014) apesar de, muitas vezes, o modelo matemático pode ser escrito de maneira compacta, isso não significa que ele possa ser resolvido por aplicativos comerciais de otimização, o que implica no uso de técnicas mais refinadas como heurísticas e meta-heurísticas.

3.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou conceitos e modelos matemáticos para problemas de localização de facilidades existentes na literatura. Com o estudo desses modelos referentes às três principais classes de problemas, de Cobertura, p -Medianas e p -Center, foi possível extrair elementos para desenvolvimento do modelo matemático a ser apresentado no próximo capítulo.

De acordo com as características pretendidas para o PLBDVR, acredita-se que, dentre as três classes de modelos aqui apresentadas, ele faça parte da classe dos problemas de cobertura. Além disso, o PLBDVR possui como peculiaridades a função objetivo que contemple especialmente a cobertura da demanda e restrições que limitam a quantidade de localizações de bases e/ou veículos e a distância máxima a ser percorrida em espaço ou tempo de viagem. Tais aspectos também estão presentes nos modelos de Toregas *et al.* (1971), Church e ReVelle (1974) e Yin e Mu (2012), e podem ser correlacionados com características dos modelos de máxima cobertura e sua variante, máxima cobertura capacitada, uma vez que deve ser limitada a capacidade de atendimento das bases de despacho.

Como é possível notar, identificou-se na literatura uma representativa abordagem relacionada com a localização de ambulâncias e demais recursos utilizados por EMS. No entanto, nos trabalhos analisados nesta revisão não foram encontrados modelos que consideram simultaneamente todas as premissas definidas a partir de necessidades identificadas durante as diversas reuniões realizadas junto ao alto comando do CBMERJ, como população atendida, tipo de ocorrência, tempo de resposta e número de bases utilizadas.

Percebe-se, então, a necessidade de propor um modelo matemático que aborde sob diversos aspectos simultâneos a otimização das localizações de bases de despacho de veículos de resgate. Além disso, o modelo que será apresentado no próximo capítulo possibilita uma melhor gestão da expansão do número de bases utilizadas, outro ponto de importância destacado pelo CBMERJ.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA PROPOSTA

Este capítulo detalha a modelagem matemática proposta para localização de bases de despacho de veículos de resgate para atendimento às chamadas de emergência que leva em consideração os conceitos apresentados nos capítulos anteriores. Com este fim, divide-se o capítulo em três seções: (1) descrição do problema com as premissas e principais questões que devem ser consideradas na modelagem bem como os dados de entrada do modelo matemático; (2) modelo matemático proposto para o problema e seu respectivo detalhamento da função objetivo, das restrições e do domínio das variáveis de decisão; e (3) considerações finais do capítulo.

4.1 Descrição do Problema, Premissas e Parâmetros Adotados

O PLBDVR tem como objetivo determinar, dentre um conjunto de bases disponíveis, aquelas que devem ser utilizadas para cobrir uma determinada área, a qual apresenta chamadas de urgência/emergência. Para atender tal objetivo, as ocorrências foram divididas em duas classes, de acordo com a natureza da chamada. As chamadas de Tipo 1 fazem referência a atendimentos gerais (doença, mal súbito, incêndio, quedas, entre outras), enquanto as ocorrências Tipo 2 estão relacionadas a acidentes de trânsito, eventos que tendem a possuir variáveis explicativas diferentes para o seu acontecimento.

Quanto às bases de despacho de veículos de resgate, as principais características associadas estão relacionadas à capacidade e à cobertura de atendimento. No que diz respeito à capacidade, cada base possui uma quantidade máxima de pessoas que pode atender, que varia de acordo com o número de veículos de resgate alocado a ela. Já a cobertura está relacionada com a área de atendimento de cada base e é capaz de limitar o conjunto de setores censitários com população possíveis de serem atendidos. Nesse sentido, a cobertura de uma base de despacho refere-se ao conjunto de setores censitários que tal base pode atender e é limitado pelo tempo de resposta do sistema.

Feitas essas observações, para o PLBDVR anteriormente descrito, consideram-se as seguintes premissas para o desenvolvimento do modelo matemático:

- i. As bases de despacho de veículos de resgate selecionadas para atender a áreas de demanda por serviços médicos de emergência devem ser escolhidas a partir de um conjunto de pontos candidatos pré-estabelecidos;

- ii. A escolha pela utilização de uma determinada base de despacho deve estar associada à cobertura da demanda e à redução tempo de resposta do sistema e da distância a ser percorrida entre a base e o local de demanda;
- iii. Deve-se considerar também o custo de utilização (abertura) de uma base de despacho no caso de escolha entre bases pré-existentes e novas bases. Tal fato torna interessante que seja dada prioridade de atendimento às bases de despacho pré-existentes, que não incidem em custos de abertura;
- iv. A quantidade de bases de despacho e de veículos disponíveis para atendimento deve ser definida previamente;
- v. Cada base de despacho apresenta uma capacidade física individual que pode ser definida pelo número de veículos de resgate que ela comporta. Tais capacidades devem ser respeitadas, não sendo possível a alocação de um número de veículos maior do que a capacidade da base;
- vi. Além da capacidade de cada unidade de apoio, deve-se considerar sua área de cobertura. Esta área pode ser definida como um conjunto de setores censitários que pode ser atendido no tempo limite estipulado; e
- vii. Como regra geral, todos as áreas de demanda devem ser atendidas por uma base de despacho de veículos de resgate. Entretanto, no caso de impossibilidade de atendimento por falta de capacidade operacional ou por restrições de cobertura (falta de bases de despacho para atendimento de uma determinada região), o modelo matemático deve indicar, com mecanismos específicos, quais foram os postos de pesquisa não atendidos, ou seja, foram alocados à uma base *dummy* (base fictícia).

Dessa forma, seja I um conjunto que representa todos os pontos de demanda (setores censitários) que necessitam de atendimentos; J um conjunto que representa os possíveis locais para receber bases de despacho de ambulâncias; $B_i \subseteq J$ um conjunto que representa todas as bases (pré-existentes e novas) que podem atender à um ponto de demanda $i \in I$, dado um padrão de cobertura preestabelecido; e $E \subseteq J$ um conjunto que representa as bases de despacho de ambulâncias pré-existentes. Com base nessas definições, considera-se ainda que:

- α_i : representa a população do ponto de demanda $i \in I$;
- β_i : representa a quantidade de ocorrências do Tipo 1 na área de demanda $i \in I$;
- γ_i : representa a quantidade de ocorrências do Tipo 2 na área de demanda $i \in I$;

- W_1 : representa o peso atribuído às ocorrências do Tipo 1;
- W_2 : representa o peso atribuído às ocorrências do Tipo 2;
- δ_j : representa o custo de abertura de uma base $j \in J$;
- $DIST_{ij}$: representa a distância euclidiana entre um ponto de demanda $i \in I$ até uma base $j \in J$;
- P : representa a quantidade total de ambulâncias disponíveis para serem alocadas aos pontos de despacho;
- $MAXP$: representa a quantidade máxima de ambulâncias que cada base pode receber;
- C : representa a capacidade de cobertura/atendimento (em número de pessoas) de cada ambulância;
- μ : representa a quantidade máxima de pontos de demanda (setores censitários) que uma base de despacho de ambulâncias pode atender;
- *dummy*: representa a base fictícia de despacho de ambulâncias, de capacidade infinita, que é utilizada somente quando nem todos os pontos de demanda podem ser cobertos;
- K : representa a penalidade atribuída a alocação de um ponto de demanda à base fictícia *dummy*;
- Q : representa a quantidade mínima de bases de despacho de ambulâncias pré-existentes que devem ser selecionadas para permitir que novas bases sejam abertas; e
- N : representa a quantidade máxima de novas bases de despacho de ambulâncias que podem ser escolhidas.

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

- $x_{ij} \in \{0,1\} \forall i \in I, j \in B_i$. Tal variável de decisão binária indica que se $x_{ij} = 1$, o ponto de demanda $i \in I$ deve ser alocado a base de despacho de ambulâncias $j \in J$. Caso contrário, $x_{ij} = 0$;
- $y_j \in \{0,1\} \forall j \in J$. Tal variável de decisão binária indica que se $y_j = 1$, a base de despacho de ambulâncias $j \in J$ deve ser aberta e/ou utilizada. Caso contrário, $y_j = 0$;

- $a \in \{0,1\}$. Tal variável de decisão binária indica que se $a = 1$, a quantidade mínima q de bases de despacho de ambulâncias foi satisfeita, caso contrário, $a = 0$; e
- $z_j \in \mathbb{Z}^+ \forall j \in J$. Esta variável representa a quantidade de ambulâncias que deve ser alocada à base $j \in J$.

Em consonância com a descrição do problema apresentado e, ao mesmo tempo, atendendo às premissas estabelecidas, o modelo matemático proposto para o problema de localização de bases de despacho de veículos de resgate é apresentado detalhadamente na seção a seguir.

4.2 Modelo Matemático

Com base na descrição do PLBDVR, a Função Objetivo é apresentada na em (4.1).

$$\begin{aligned}
 \text{Maximizar} \quad & \sum_{i \in I} \sum_{j \in B_i} \alpha_i x_{ij} + W_1(\beta_i x_{ij}) + W_2(\gamma_i x_{ij}) - \sum_{j \in J \setminus J_i} \delta_j y_j \\
 & - \sum_{i \in I} \sum_{j \in B_i} \text{DIST}_{ij} x_{ij} - \sum_{i \in I} K(\alpha_i x_{i,dummy})
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

A Função Objetivo (4.1), que deve ser maximizada, é composta por seis termos:

- O primeiro termo refere-se à cobertura da população, ou seja, a quantidade de habitantes nos setores censitários que serão atendidos;
- O segundo termo consiste na prioridade de atendimento aos setores censitários com maior quantidade de registros de ocorrências do Tipo 1, relativas a ocorrências gerais;
- O terceiro termo reflete a prioridade de atendimento aos setores censitários com maior quantidade de registros de ocorrências do Tipo 2, relativas a acidentes de trânsito;
- O quarto termo consiste nos custos associados à abertura das bases de despacho, ou seja, está relacionado com a quantidade de bases que deve ser aberta;
- O quinto termo incide na distância percorrida entre as bases de despacho dos veículos e os centroides dos setores censitários que estes veículos atendem, o que influencia no tempo de atendimento a cada setor; e

- Já o último termo refere-se às penalidades inerentes à alocação de bases de despacho *dummy* à setores censitários.

Vale destacar que, diante da constatação da existência de um *trade off* entre a maximização da cobertura (priorizando a cobertura de áreas de demanda com maior registro histórico de atendimentos) e a minimização da quantidade de bases abertas e da distância entre essas bases e os pontos de demanda, percebe-se que se trata de um problema multiobjetivo, que poderia ser abordado, também, sob a ótica da modelagem multicritério.

Após a definição da Função Objetivo, são descritas as restrições do problema. O conjunto de Restrições (4.2) garante que todo ponto de demanda deve ser atendido uma única vez por uma base de despacho de veículos de emergência. Para que tal atendimento ocorra, uma base de despacho pré-existente ou do tipo *dummy* deve ser alocada ao ponto de demanda.

$$\sum_{j \in B_i} x_{ij} + x_{i,dummy} = 1 \quad \forall i \in I \quad (4.2)$$

O conjunto de Restrições (4.3) garante que um ponto de demanda somente poderá ser atendido por uma base de despacho de veículos de resgate se esta base estiver disponível para atendimento e for selecionada para abertura. Dessa forma, fica proibida a alocação de bases de despacho não selecionadas a pontos de demanda.

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in I, j \in B_i \quad (4.3)$$

A Restrição (4.4) garante que a quantidade total de veículos de resgate alocados nas bases de despacho deve respeitar a quantidade total disponível. Essa restrição possibilita o rearranjo dos veículos entre as bases de despacho sem o risco de se utilizar mais veículos que o disponível.

$$\sum_{j \in J} z_j \leq P \quad (4.4)$$

Complementando a Restrição (4.4), o conjunto de Restrições (4.5) garante que a capacidade de cada base de despacho, em quantidade de pessoas que podem ser atendidas,

deve ser respeitada. Tal limite é definido pelo produto da quantidade de veículos alocado à determinada base e a quantidade de pessoas que cada veículo pode atender. O cálculo de quantas pessoas estão associadas a cada veículo pode ser obtido pela divisão entre a população do município e o total de veículos disponíveis.

$$\sum_{i \in I} \alpha_i x_{ij} \leq C z_j \quad \forall j \in B_i \quad (4.5)$$

O conjunto de Restrições (4.6) garante que a quantidade máxima de pontos de demanda que cada base de despacho pode atender deve ser respeitada. Tal restrição indica que uma base fica impossibilitada de atender novos pontos de demanda caso sua capacidade de atendimento tenha sido esgotada.

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq \mu \quad \forall j \in B_i \quad (4.6)$$

As Restrições (4.7) e (4.8) trabalham em conjunto para garantir que novas bases de despacho de veículos de resgate só serão abertas se uma quantidade mínima q de bases pré-existentes forem selecionadas.

$$\frac{\left(\sum_{j \in E} y_j - Q \right)}{|E|} \leq a \leq \frac{\left(\sum_{j \in E} y_j - Q \right)}{|E|} + 1 \quad (4.7)$$

$$\sum_{j \in J \setminus E} y_j \leq N a \quad (4.8)$$

Por último, as Restrições (4.9), (4.10), (4.11) e (4.12) estão associadas ao domínio das variáveis de decisão do modelo matemático.

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in \{B_i, dummy\} \quad (4.9)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (10)$$

$$a \in \{0,1\} \quad (11)$$

$$z_j \in \{0, 1, 2, \dots, MAXP\} \quad \forall j \in J \quad (12)$$

4.3 Considerações Finais

Neste capítulo apresentou-se a modelagem matemática proposta para localização de bases de despacho de veículos de resgate para atendimento de chamadas de emergência. Primeiramente foi estabelecido um conjunto de premissas referentes aos atendimentos de emergência, o qual fornece base para compreensão do seu funcionamento; aspectos relacionados à cobertura das bases de despacho; tempo de resposta e alocação de veículos de resgate; além de outras características capazes de limitar a cobertura do serviço (restrições do problema).

Com base nas premissas adotadas, foram definidos os elementos que compõem o modelo matemático, a saber: os conjuntos que representam as bases de despacho, os pontos de demanda; a quantidade de veículos de resgate que pode ser disponibilizado em cada base de despacho; os parâmetros de entrada do modelo; e as variáveis de decisão envolvidas. Frente a definição de todos os elementos enunciados acima, nos próximos capítulos são apresentadas as aplicações computacionais para o problema de localização de bases de despacho de veículos de resgate com objetivo de avaliar o modelo proposto e seus resultados em diferentes aplicações.

5 ESTUDO DE CASO

Este capítulo apresenta algumas aplicações (cenários) do modelo matemático proposto direcionadas ao município do Rio de Janeiro, as quais contribuem para a avaliação das soluções e complexidades do problema. Sendo assim, este capítulo está dividido, basicamente, em duas seções: (1) descrição da área de estudo, com análises espaciais e temporais das chamadas de emergência e descrição de possíveis variáveis explicativas para as chamadas de emergência no município do Rio de Janeiro; (2) definição dos cenários propostos, com seus parâmetros, características e objetivos; e (3) considerações finais do capítulo.

5.1 Descrição da Área de Estudo

O modelo matemático apresentado no Capítulo 4 foi aplicado à cidade do Rio de Janeiro, capital do estado de mesmo nome, localizado na região sudeste do Brasil, como pode-se observar na Figura 5.1. O território municipal, superior a 1.200 km², é dividido em quatro regiões geográficas: Centro, Zona Norte, Zona Sul e Zona Oeste. Frente à necessidade de uma divisão setorial que facilitasse o planejamento da administração municipal, foram instituídas cinco Áreas de Planejamento (AP), sendo: AP 1 (Centro), AP 2 (Zona Sul), AP 3 (Zona Norte), AP 4 (Barra-Jacarepaguá) e AP 5 (Zona Oeste), conforme Figura 5.2.

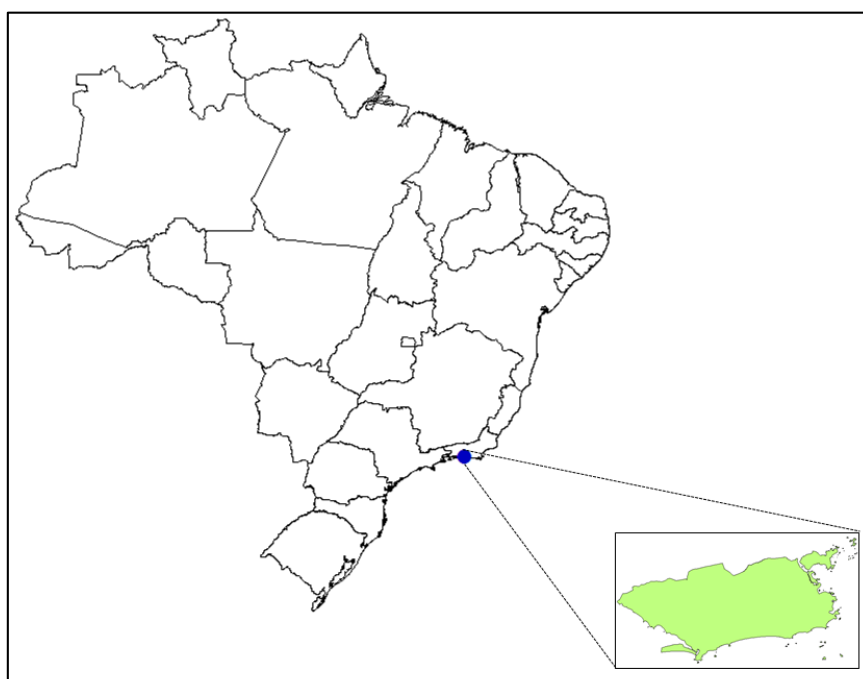


Figura 5.1 – Localização geográfica do município do Rio de Janeiro

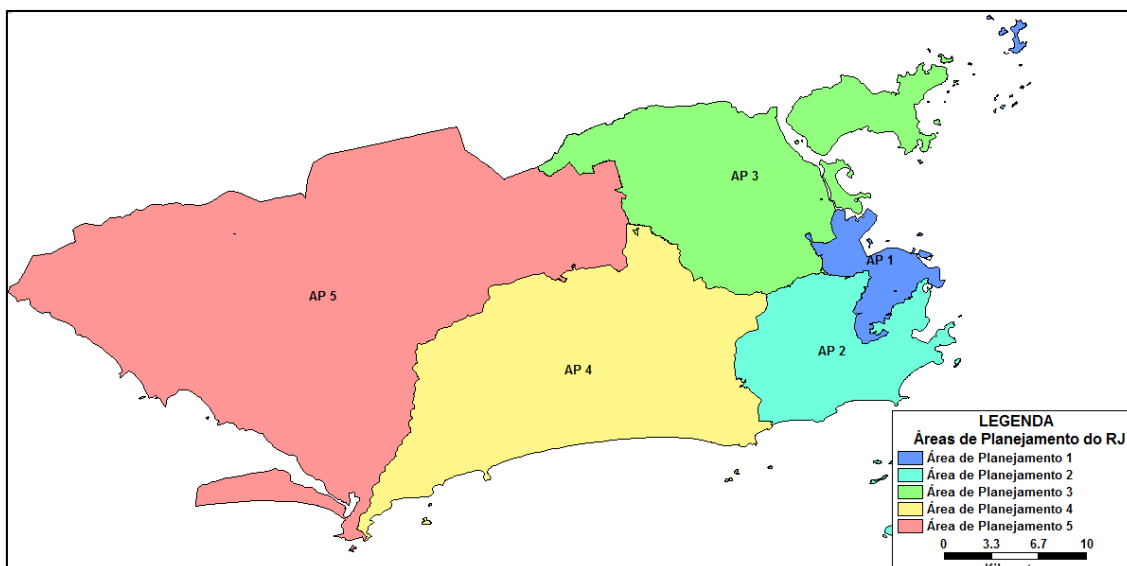


Figura 5.2 – Representação das Áreas de Planejamento (AP) do Rio de Janeiro

Segunda metrópole brasileira em número de habitantes, no ano de 2010 a população do Rio de Janeiro passava dos 6,3 milhões, com estimativa de 6.498.837 habitantes para o ano de 2016 (IBGE, 2016). Apesar da população ser 100% urbana, devido à grande presença de áreas de vegetação, características de relevo e outros aspectos naturais, ela não está distribuída uniformemente pelo território da cidade, como pode ser observado na Figura 5.3. Nesta figura percebe-se que nem todos os 10.504 setores censitários do município possuem população residente, apesar de, ainda assim, necessitarem de atendimentos de emergência.

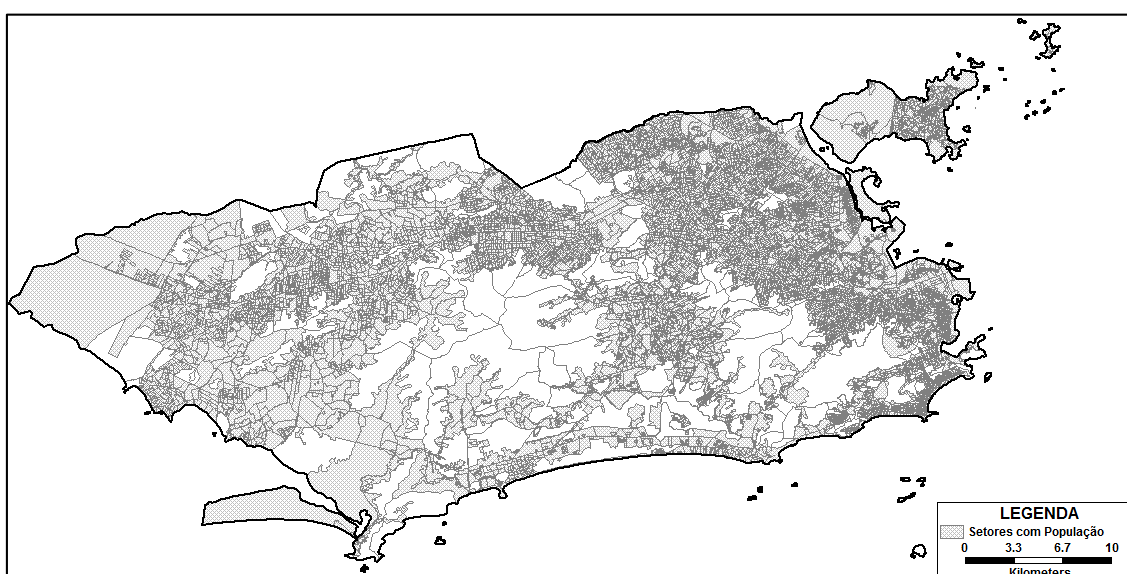


Figura 5.3 – Representação dos setores censitários do município

Entre os 160 bairros em que o município é dividido, o mais populoso deles é Campo Grande, localizado na Zona Oeste, com mais de 320 mil habitantes. Essa mesma região geográfica apresenta outros bairros com grande quantidade de habitantes, como Santa Cruz, Bangu e Realengo, indicativo do alto crescimento populacional da região, não acompanhado por um desenvolvimento similar. Já em bairros da Zona Sul, a característica que se mostra predominante é a alta concentração de idosos. Em Copacabana, por exemplo, cerca de 25% de seus moradores possuem 60 anos ou mais. (IBGE, 2011)

É válido destacar que o adensamento urbano da Zona Oeste registrado nas últimas décadas ocorreu, especialmente, em função da elevada ocupação populacional já registrada nas Zonas Norte e Sul. Apesar do desenvolvimento naquela região não ter seguido o mesmo ritmo do crescimento populacional, percebe-se que houve aumento considerável na oferta de serviços, principalmente na AP 4, com destaque para a região da Barra da Tijuca, a qual tem se configurado como um novo centro econômico para a cidade do Rio de Janeiro.

O EMS da cidade fica sob a responsabilidade do CBMERJ que atende às solicitações de emergência em toda a extensão territorial, independente de sua gravidade. Tal órgão recebe as demandas do serviço 192 (direcionadas ao SAMU) e do 193 (destinadas ao resgate do Corpo de Bombeiros). Ambos funcionam a partir da central de chamadas que recebem as ligações e emitem ordens de apoio às diferentes ações. Este procedimento implica diretamente no tempo de resposta do sistema, que engloba o intervalo de tempo entre o recebimento da chamada e a chegada da equipe de atendimento ao local. Apesar de não haver regulamentação específica no Brasil, o Corpo de Bombeiros estipula como meta 10 minutos para o tempo de resposta do atendimento em ambiente urbano, seguindo a norma norte americana da Lei de EMS de 1973 (Ball e Lin, 1993).

O CBMERJ possui 36 bases de despacho de ambulâncias, também conhecidas como Unidades de Bombeiro Militar (UBM), já instaladas ao longo do território municipal (Figura 5.4). Essas bases, que são responsáveis pelo despacho de veículos do SAMU e do resgate do Corpo de Bombeiros, possuem características físicas diferentes entre si, o que contribui para a diversificação de sua capacidade física (em número de ambulâncias). Sendo assim, cada base é capaz de receber no máximo cinco veículos, sendo que não ocorrem trocas de veículos entre as bases, ou seja, cada veículo está associado a uma determinada base apenas. Apesar disso, vale destacar que, no modelo matemático, optou-se por flexibilizar a reorganização de veículos entre as bases.

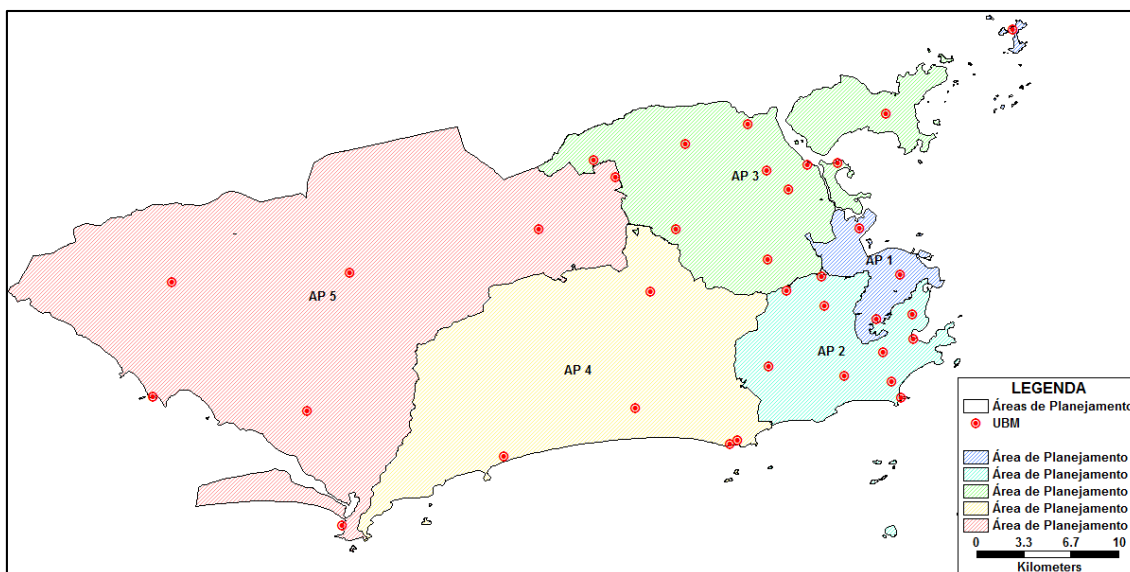


Figura 5.4 – Representação das bases de atendimento do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro por AP

Em cada UBM existe até três tipos de veículos disponíveis: Ambulâncias de Suporte Básico, Intermediário (ou de Resgate) e Avançado. Segundo o Ministério da Saúde (2003a), a Ambulância de Suporte Básico é o veículo destinado ao atendimento pré-hospitalar de pacientes de menor gravidade ou com risco de vida desconhecido. A Ambulância de Suporte Intermediário é para o atendimento de pacientes vítimas de acidentes ou então que se encontrem em locais de difícil acesso. Já a Ambulância de Suporte Avançado é um veículo equipado com material similar ao de uma Unidade de Terapia Intensiva e destina-se ao atendimento de pacientes de alto risco em emergências pré-hospitalares, que necessitam de cuidados médicos intensivos.

Apesar dos diferentes tipos de veículos disponíveis para o atendimento de emergência, nem sempre a classificação de risco do paciente é possível de ser realizada. Nesses casos, o atendente da central de chamadas é orientado a liberar o veículo mais próximo do local onde se encontra o paciente, de forma a realizar o primeiro atendimento no mais breve tempo possível.

Para definição das bases candidatas a cobertura de cada um dos setores censitários (conjunto B_i), foi utilizada a base rodoviária real do município do Rio de Janeiro (Figura 5.5) e, com auxílio do TransCAD 5.0 (Caliper, 2008), foram calculados os tempos mínimos de deslocamento entre as bases e os setores, para definição das áreas de cobertura. O tempo máximo estabelecido foi de 10 minutos, seguindo os preceitos do CBMERJ. Por se tratar de uma rede com as reais características do Rio de Janeiro, deve-se levar em conta a possibilidade de restrições provocadas por obras, como o caso dos

preparativos para os Jogos Olímpicos Rio 2016, uma vez que no período de aplicação do estudo de caso elas estavam em pleno andamento. Com relação às distâncias consideradas na função objetivo, foram adotadas distâncias Euclidianas.

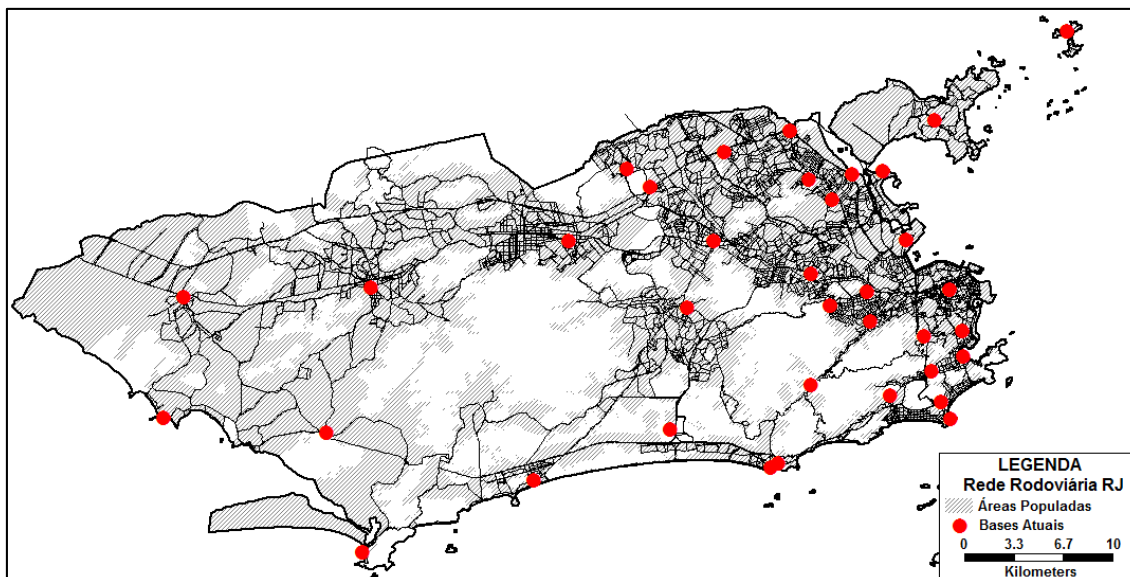


Figura 5.5 – Representação da rede rodoviária do Rio de Janeiro

No ano de 2014 foram registradas 105.969 ocorrências de solicitação de atendimento, originadas por diferentes enfermidades. Tais ocorrências foram atendidas pelas 36 bases de despacho de ambulâncias, com um número estimado de 80 ambulâncias. Desse total de ocorrências, 70.536 possuíam endereço completo e foram georreferenciados para aplicação neste trabalho.

Partindo da premissa de que cada base pode abrigar no máximo cinco veículos de resgate, mostrou-se necessário estabelecer a capacidade de cobertura de cada uma dessas bases, em função no número de ambulâncias que comportam. A capacidade de cobertura atribuída a cada ambulância foi definida pela divisão da população do município em 2014 (6.320.446 habitantes) pelo total de veículos disponíveis (80 veículos). Portanto, estipulou-se que cada ambulância é responsável pela cobertura de 80.000 habitantes, valor abaixo da proporção estipulada pelo Ministério da Saúde (2003b), que prevê um veículo de suporte básico para cada 100.000 a 150.000 habitantes e um veículo de suporte avançado para cada 400.000 a 450.000 habitantes.

Com isso, percebe-se ainda que a capacidade de cobertura dessas bases pode variar entre 80.000 pessoas, para bases com apenas um veículo alocado, e 400.000 pessoas, quando a base possui cinco veículos.

5.1.1 Análise espacial e temporal das chamadas de emergência na área de estudo

Para analisar a distribuição das chamadas de emergência, bem como caracterizar a ocorrência dos mesmos na área urbana do Rio de Janeiro, fez-se necessário obter suas características, distribuição espacial e temporal, entre diversos outros aspectos. Esta análise precisa ser feita para todos os dados georreferenciados, que se apresentam dispersos por todo o município.

Assim, a partir do banco de dados fornecido pelo CBMERJ, realizou-se uma análise de todas as chamadas de emergência ocorridas na cidade. No período de 12 meses (ou seja, entre 01 de janeiro e 31 de dezembro de 2014) foram consideradas as 70.536 ocorrências que resultaram no envio de pelo menos uma equipe de resgate e puderam ser georreferenciadas.

A Figura 5.6 demonstra a distribuição das chamadas de emergência de acordo com o bairro de origem. Percebe-se que apenas 23 bairros concentram metade das ligações direcionadas aos serviços de emergência do município. Quando se amplia o escopo para 70 bairros, o percentual de chamadas chega a 80% do total.

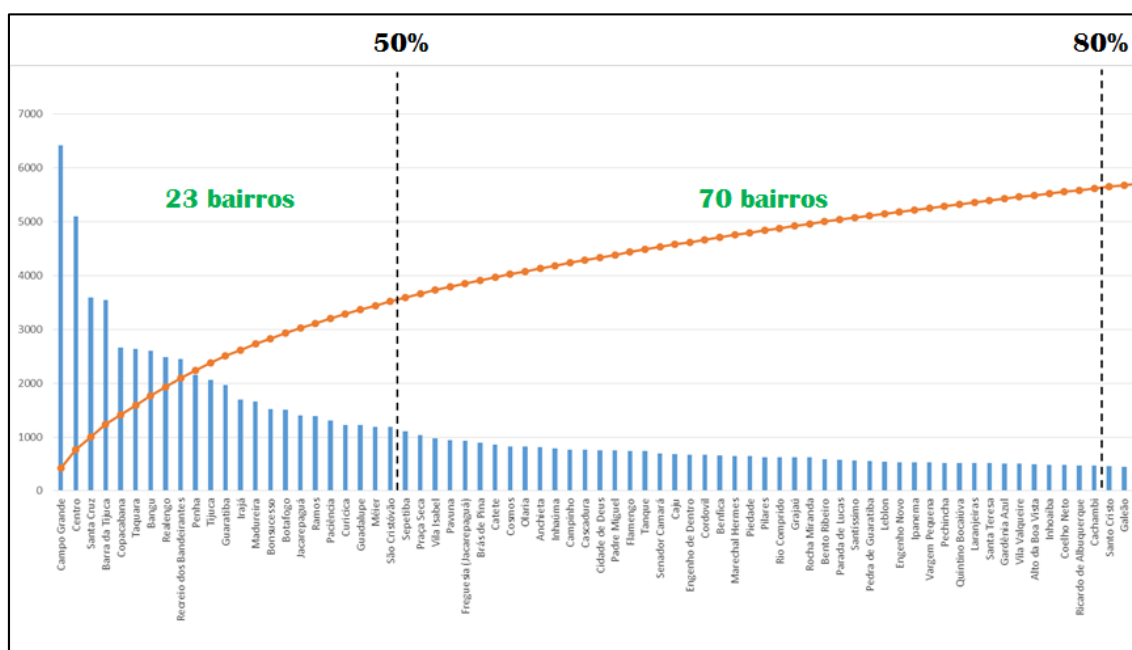


Figura 5.6 – Distribuição das chamadas de emergência por bairros do Rio de Janeiro

A configuração espacial destes bairros, no entanto, é bastante distinta. Entre os 23 com maior número de chamadas direcionadas ao CBMERJ estão presentes bairros como Campo Grande, Centro, Santa Cruz, Barra da Tijuca, Copacabana, Taquara, Penha, Tijuca, Madureira, Botafogo, Méier e São Cristóvão. Tais bairros fazem parte das cinco

áreas de planejamento do município, o que a princípio representa não haver grande diferenciação entre as AP neste sentido. A Figura 5.7, no entanto, apresenta o número de chamadas por AP, indicando que as áreas com maior número de registros estão localizadas nas AP 3 e 5, possivelmente em decorrência de suas amplas extensões territoriais, grande quantidade de habitantes e índices de violência. Vale ressaltar, no entanto, que por ser um órgão estadual, ocasionalmente o CBMERJ realiza resgates fora dos limites do município do Rio de Janeiro, especialmente em casos de chamadas recebidas quando o veículo se encontra fora da base de despacho, possivelmente mais próximo do local da chamada do que viaturas de outros municípios.

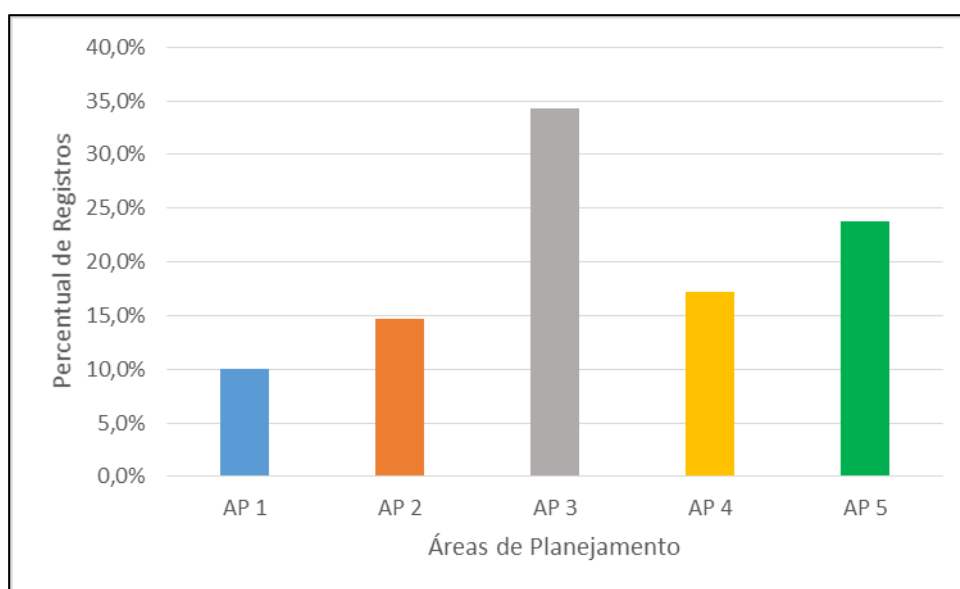


Figura 5.7 – Distribuição das chamadas de emergência por AP do Rio de Janeiro

Quanto ao local de ocorrência da chamada, percebe-se na Figura 5.8 que os mais expressivos são as residências e as vias públicas, que juntos representam quase 90% do total de ligações recebidas pelo CBMERJ. Acredita-se que locais como centros esportivos, bares, indústrias e escolas são mais propensos a realizar chamadas de emergência em caso de incidentes inesperados, normalmente relacionados à traumas e fraturas, o que poderia explicar a baixa incidência de chamadas originadas nestes locais.

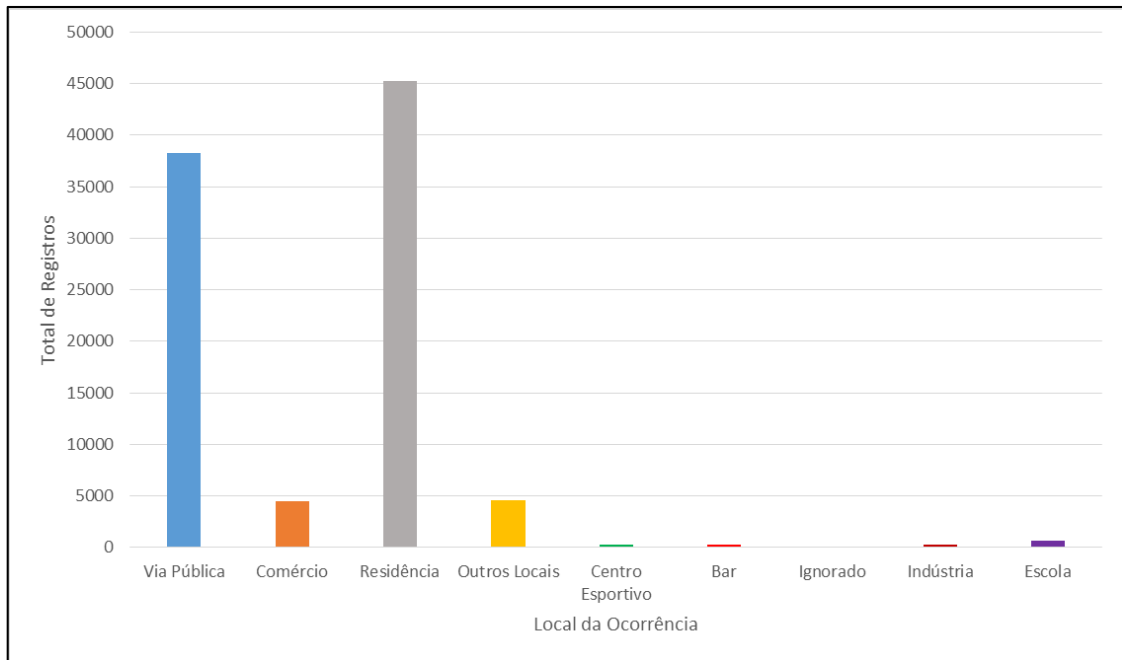


Figura 5.8 – Distribuição das chamadas de emergência por local de ocorrência

Já a Figura 5.9 indica o número de chamadas recebidas discriminados pelo horário do dia. Percebe-se que a maioria das chamadas foi recebida entre 09:00 h e 20:00 h, sendo que a hora crítica é entre 12:00 h e 13:00 h. Em contrapartida, nota-se uma baixa demanda por serviços de emergência entre 02:00 h e 06:00 h. Tal fato levanta a possibilidade de uma maior incidência de chamadas ocorrer durante o horário comercial, informação de grande relevância que deve ser testada como variável explicativa dos fenômenos.

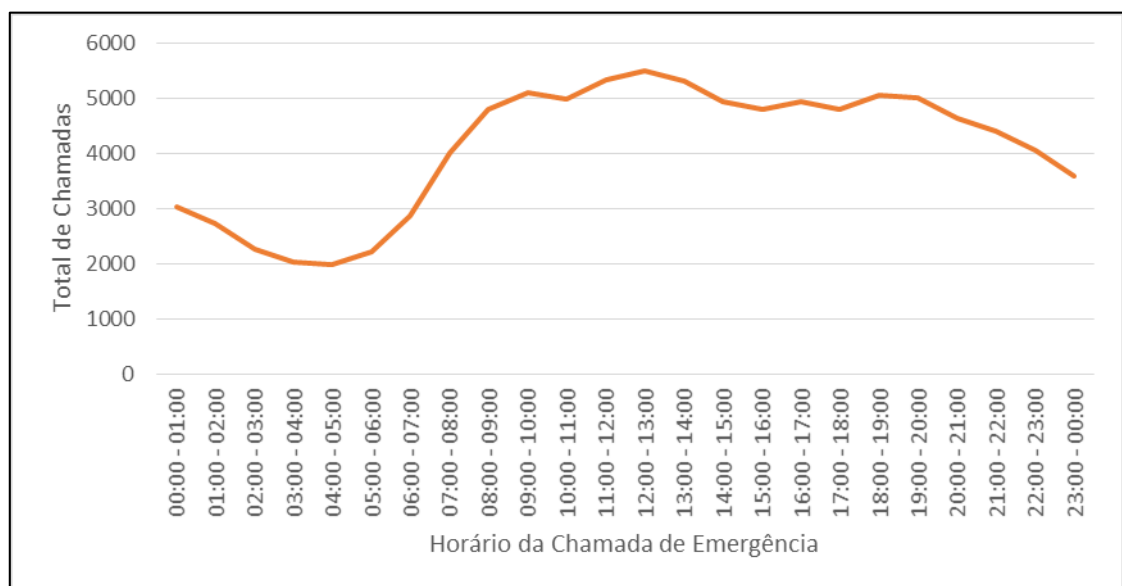


Figura 5.9 – Distribuição das chamadas de emergência ao longo do dia

A distribuição dos atendimentos por meses do ano pode ser observada na Figura 5.10. Como pode-se verificar, o mês de Janeiro é o mais representativo em número de atendimentos, seguindo pelos meses de Setembro e Outubro. Possivelmente Janeiro apresenta maiores valores devido ao período de férias, que atrai ainda mais visitantes para a cidade, tendo em vista seu elevado potencial turístico. Nota-se, ainda, uma redução significativa no número de atendimentos nos meses de Fevereiro, Março e Junho. Já quanto à distribuição semanal dos atendimentos (Figura 5.11), percebe-se que o maior número de registros ocorre às sextas-feiras e aos sábados.

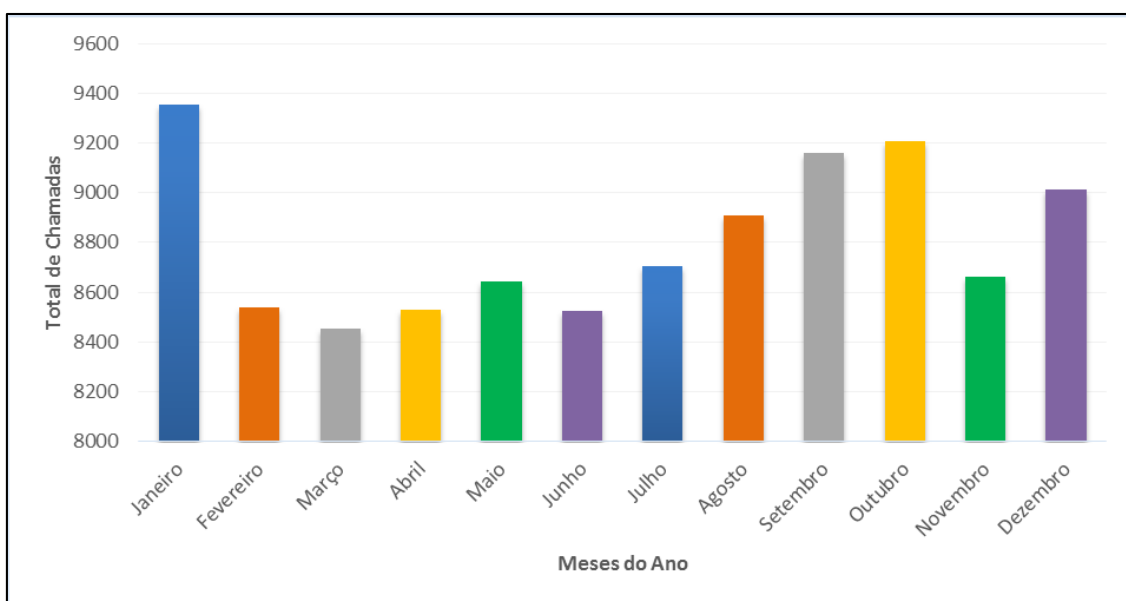


Figura 5.10 – Distribuição das chamadas de emergência por meses do ano

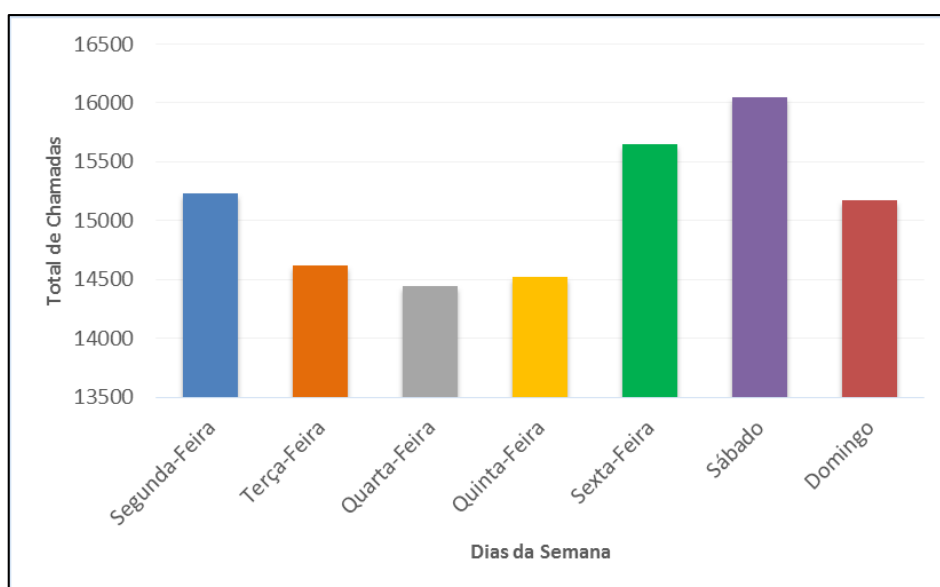


Figura 5.11 – Distribuição das chamadas de emergência por dia da semana

Quanto ao tipo de ocorrência, percebe-se que cerca de 85% do total de chamadas (60.168) envolvem ocorrências gerais como mal súbito, infarto, fraturas, problemas respiratórios, entre diversos outros. Os 15% restantes, correspondentes à 10.368 ocorrências, estão relacionados à acidentes de trânsito que, assim como as demais ocorrências, representam eventos espaciais aleatórios caracterizados por serem espacialmente dependentes (Levine *et al.*, 1995). Essas informações podem ser visualizadas na Figura 5.12.

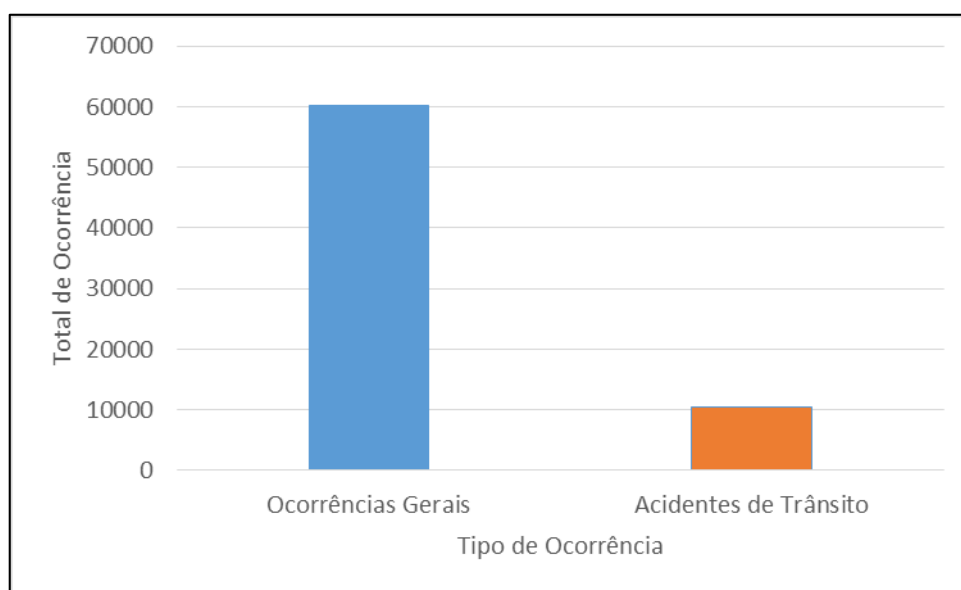


Figura 5.12 – Distribuição das chamadas de emergência por tipo de ocorrência

Um diagnóstico complementar a respeito das ocorrências que geram chamadas de emergência para o CBMERJ no município do Rio de Janeiro pode ser realizado por meio do levantamento e análise de variáveis explicativas para tais fenômenos. Tal investigação pode ser verificada na Seção 5.1.2, a seguir.

5.1.2 Análise estatística dos dados de chamadas

A análise estatística dos dados do CBMERJ pode ser dividida, basicamente, em três etapas: (1) tratamento dos dados obtidos; (2) buscas na literatura de possíveis variáveis explicativas para os fenômenos analisados; e (3) aplicação de ferramentas estatísticas na análise de correlação entre as variáveis e as ocorrências registradas.

Na Etapa 1, que aborda o tratamento dos dados recebidos do CBMERJ, foram georreferenciadas informações sobre as ocorrências de chamadas de emergência no ano de 2014, com o auxílio do TransCAD 5.0 (Caliper, 2008). Do total de 105.969 ocorrências

registradas no ano de 2014 no Rio de Janeiro, foi possível georreferenciar 70.536. Com isso, houve um descarte de, aproximadamente, 33% da amostra que não possuía registro de endereço ou o mesmo encontrava-se incompleto. As ocorrências de chamadas de emergência estão distribuídas espacialmente pela cidade conforme apresentado na Figura 5.13.

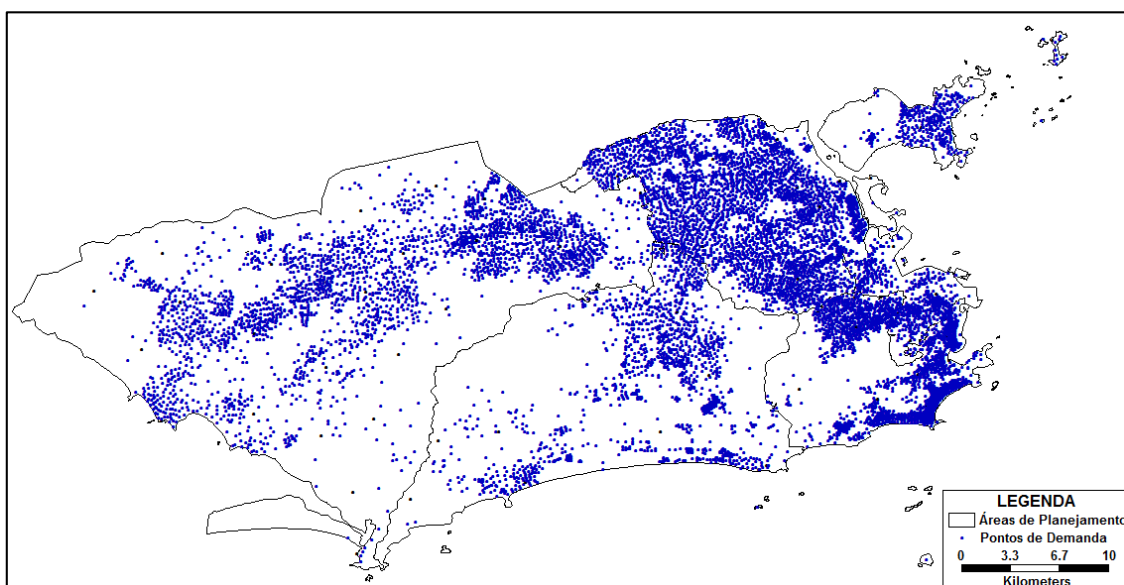


Figura 5.13 – Distribuição espacial das chamadas de emergência no Rio de Janeiro

Na Etapa 2, foram obtidas as possíveis variáveis explicativas para o problema e, posteriormente, realizou-se diversas consultas a dados socioeconômicos e demográficos fornecidos pelo IBGE, com o intuito de reunir o maior número de variáveis possíveis referentes a região de aplicação deste estudo de caso. Como zoneamento territorial, utilizou-se a segmentação por bairros, que representa a união de setores censitários, uma vez que nem todas as variáveis identificadas possuíam setor censitário como nível de desagregação, como é o caso do número de empregos formais, por exemplo.

Um estudo de Channouf *et al.* (2007) aponta que é possível realizar previsões de demandas diárias e horárias para serviços médicos de emergência com base em modelos de séries temporais, especialmente as regressões. Para tanto, os autores sugerem que sejam feitas investigações relacionadas ao tempo e às variáveis sociodemográficas com vista a realizar uma previsão da distribuição espacial da demanda por este tipo de serviço.

Tendo em vista a grande quantidade de ocorrências registradas com origem em vias públicas e no comércio, assim como a distribuição horária das chamadas, considerou-se, ainda, a possibilidade de relacionar as ocorrências de chamadas de emergência com

as dimensões e a velocidade máxima permitida nas vias, a população residente nas localidades e o número de empregos gerados. Um exemplo de importância da inclusão destas variáveis é apontado pelo Instituto de Segurança Pública do Rio de Janeiro – ISP (2012), que relaciona os locais mais críticos para a ocorrência de acidentes com vítimas no município do Rio de Janeiro, a saber: Avenida Brasil; Avenida Presidente Vargas; e Avenida das Américas. Tais locais apresentam altos índices de circulação de veículos, grandes dimensões e elevado número de faixas, além da intensa circulação de pessoas nos arredores, devido ao elevado número de empregos nas regiões.

Com base nessas afirmações, as variáveis escolhidas para realização dos testes iniciais foram: população, densidade populacional, renda per capita, número de empregos, número de estabelecimentos comerciais, comprimento de vias com velocidade permitida entre 10 e 39 km/h, comprimento de vias com velocidade permitida entre 40 e 60 km/h, comprimento de vias com velocidade permitida entre 61 e 80 km/h, além da densidade de vias (estas quatro últimas apenas para as ocorrências de acidentes de trânsito).

Tais variáveis foram aplicadas a regressões lineares simples e múltiplas na Etapa 3. A análise de correlação, aplicada após a regressão linear simples das variáveis realizadas individualmente, foi executada pelo teste do *p*-valor, que representa a probabilidade de o efeito observado entre as variáveis ser devido ao acaso, e não aos fatores que estão sendo estudados. Considerou-se a variável significativa estatisticamente quando $p < 0,05$, ou seja, admitiu-se uma margem de segurança 5% para erros. Acima deste valor, a variável foi imediatamente descartada. Por fim, as variáveis foram aplicadas a uma regressão linear múltipla, sob os mesmos critérios de análise, onde acrescentou-se uma análise do R^2 ajustado, aceitando como de maior representatividade variáveis com R^2 ajustado $> 0,70$. Com isso torna-se possível equacionar tais variáveis com o intuito de obter uma função explicativa para as ocorrências gerais e de acidentes de trânsito separadamente.

O resultado da primeira etapa da regressão (regressão linear simples) aplicada separadamente às ocorrências de chamadas de emergência (ocorrências gerais e acidentes de trânsito) e possíveis variáveis explicativas pode ser visualizado na Tabela 5.1.

Diante dos resultados iniciais é possível apontar que a renda per capita não se mostra como variável explicativa em ambos os tipos de ocorrência, por apresentar *p*-valor superior a 0,05. Já a densidade populacional se mostra insatisfatória apenas para as ocorrências que envolvem acidentes de trânsito. As demais variáveis, apesar de não

apresentarem problemas relacionados ao teste de p -valor, mostraram-se inicialmente insatisfatórias segundo os critérios do R^2 ajustado, no entanto, esta análise representa apenas o quanto cada variável pode contribuir para explicar um dado fenômeno.

Tabela 5.1 – Resultado geral da regressão linear simples

Variável	Ocorrências Gerais		Acidentes de Trânsito	
	R^2 ajustado	p -valor	R^2 ajustado	p -valor
População	0,76	0,00	0,61	0,00
Densidade Populacional	0,06	0,00	0,01	0,07
Renda per Capita	-0,01	0,87	0,01	0,12
Número de Empregos	0,28	0,00	0,12	0,00
Número de Estabelecimentos Comerciais	0,39	0,00	0,29	0,00
Comprimento de Vias 10-39 km/h	-	-	0,67	0,00
Comprimento de Vias 40-60 km/h	-	-	0,57	0,00
Comprimento de Vias 61-80 km/h	-	-	0,11	0,00
Densidade de Vias	-	-	0,04	0,00

Uma análise de mais relevância para os valores de R^2 ajustado pode ser observada nas Tabelas 5.2 e 5.3.

Tabela 5.2 – Resultado da regressão linear múltipla para ocorrências gerais

Variável	Teste 1		Teste 2	
	Coefficiente	p -valor	Coefficiente	p -valor
Interseção	99,967	0,00	60,128	0,00
População	0,007	0,00	0,007	0,00
Densidade Populacional	-0,002	0,23	-	-
Renda per Capita	-0,021	0,10	-	-
Número de Empregos	0,002	0,00	0,003	0,00
Número de Estabelecimentos Comerciais	0,030	0,08	-	-
R^2 ajustado	0,88		0,88	

Diante dos resultados da Tabela 5.2 é possível observar que foram necessários apenas dois testes para encontrar as possíveis variáveis explicativas para as chamadas de ocorrências gerais. No primeiro teste, apesar do R^2 ajustado de 0,88, as variáveis Densidade Populacional, Renda per Capita e Número de Estabelecimentos Comerciais apresentaram inconsistências relacionadas ao p -valor, com margem de erro superior a 5%. No segundo teste, quando foram retiradas essas variáveis, verificou-se que o R^2 ajustado manteve-se o mesmo e os coeficientes das possíveis variáveis explicativas permaneceram próximos dos apresentados no primeiro teste.

Frente a isto, a função explicativa com o equacionamento das variáveis representativas para as chamadas quem envolvem ocorrências gerais pode ser vista na Equação (5.1):

$$Oco_1 = 60,126 + 0,007 Pop + 0,003 Emp \quad (5.1)$$

onde: Oco_1 corresponde à ocorrência do tipo 1 (atendimentos gerais); Pop é a população residente; e Emp é o número de empregos formais.

Tabela 5.3 – Resultado da regressão linear múltipla para acidentes de trânsito

Variável	Teste 1		Teste 2	
	Coefficiente	<i>p</i> -valor	Coefficiente	<i>p</i> -valor
Interseção	19,902	0,00	12,186	0,00
População	0,000	0,00	0,001	0,00
Densidade Populacional	-0,001	0,30	-	-
Renda per Capita	-0,001	0,78	-	-
Número de Empregos	-0,001	0,01	-0,001	0,00
Estabelecimentos Comerciais	0,016	0,00	0,016	0,00
Comprimento de Vias 10-39 km/h	2,000	0,00	2,064	0,00
Comprimento de Vias 40-60 km/h	1,910	0,00	1,914	0,00
Comprimento de Vias 61-80 km/h	-4,545	0,00	-4,542	0,00
Densidade de Vias	-0,438	0,64	-	-
R² ajustado	0,80		0,80	

Assim, pode-se observar que também foram necessários apenas dois testes para encontrar as possíveis variáveis explicativas para o problema. No primeiro teste, apesar do R^2 ajustado de 0,80, as variáveis Densidade Populacional, Renda per Capita e Densidade de Vias apresentaram inconsistências relacionadas ao p -valor, com margem de erro superior a 5%. Ao retirar tais variáveis no segundo teste, verificou-se que o R^2 ajustado manteve-se com o mesmo valor. No entanto percebeu-se que houve uma relação inversamente proporcional entre o número de chamadas por acidentes de trânsito e o Comprimento de Vias de 61-80 km/h e o Número de Empregos.

Diante dos resultados da Tabela 5.3, percebe-se que uma atenção especial deve ser dada as variáveis de comprimento de vias, especialmente àquelas com menores limites de velocidade, uma vez que são destacadas como as variáveis mais representativas ao explicar a ocorrência de acidentes com vítima. Tal circunstância pode ter relação com o fato dessas vias, normalmente, serem vias principais de bairros, que apresentam elevado percentual de pedestres e usuários de transporte não motorizado. Em contrapartida,

segmentos com velocidade entre 61 e 80 km/h, normalmente caracterizam vias expressas, onde a presença de pedestres é restrita ou mesmo proibida.

Diante disso, a função explicativa com o equacionamento das variáveis representativas para as chamadas quem envolvem acidentes de trânsito pode ser vista na Equação (5.2):

$$Oco_2 = 12,186 + 0,001 Pop - 0,001 Emp + 0,016 EstCom + 2,064 CV_1 + 1,914 CV_2 - 4,542 CV_3 \quad (5.2)$$

onde: Oco_2 corresponde à ocorrência do tipo 2 (acidentes de trânsito); Pop é a população residente; Emp é o número de empregos formais; $EstCom$ é o número de estabelecimentos comerciais; CV_1 é o comprimento de vias com velocidades variando entre 10 e 39 km/h; CV_2 é o comprimento de vias com velocidades variando entre de 40 e 60 km/h; e CV_3 é o comprimento de vias com velocidades variando entre de 61 e 80 km/h.

Tal análise foi realizada com o intuito de possibilitar um estudo de previsão de demanda para ocorrência de chamadas de emergência no município do Rio de Janeiro. De maneira indireta ela contribui para a aplicação do modelo matemático em tempos futuros, tendo em vista que, por meio de estimativas das variáveis explicativas é possível apontar, a nível de bairros, a quantidade de ocorrência previstas para um determinado período. No entanto, a utilização deste estudo na aplicação do modelo matemático para o futuro deve levar em conta, ainda, atualizações na rede rodoviária municipal, uma vez que podem haver mudanças tanto de infraestrutura viária quando nas velocidades médias dos arcos da rede.

5.2 Definição dos Cenários Propostos

Como resultado do modelo, devem ser indicados os locais prioritários para receberem as bases, a quantidade de veículos (ambulâncias) em cada um desses locais, e ainda, a delimitação das suas áreas de cobertura, respeitando o tempo de resposta (deslocamento) de até 10 minutos, a partir da base até cada um dos setores censitários a qual foi alocada. Diante disso, nesta seção são apresentados 11 cenários para aplicação do modelo matemático proposto no Capítulo 4.

Nas subseções seguintes são apresentados os parâmetros comuns aos 11 cenários propostos para avaliação do modelo matemático recomendado para o PLBDVR, auxiliando assim, no planejamento dos serviços médicos de emergência do CBMERJ.

5.2.1 *Parâmetros comuns para os cenários propostos*

Diferentes cenários são propostos neste trabalho, entre outros motivos, para permitir uma avaliação comparativa dos resultados do modelo matemático para diferentes situações como, por exemplo, variações no número de bases de despacho disponíveis e na quantidade de veículos de resgate. Para tanto, alguns parâmetros comuns foram adotados para todos os cenários.

Conforme apresentado na Seção 5.1, foram consideradas as 36 UBMs distribuídas pelo território municipal, sendo que cada uma pode comportar até cinco veículos de resgate, de acordo com seu dimensionamento físico. Além disso, considerou-se que cada veículo é responsável pelo atendimento de até 80.000 pessoas, o que determina indiretamente a capacidade de atendimento das bases de despacho.

Em conversas com o CBMERJ, optou-se por simular situações que permitissem a abertura de novas bases de despacho, desde que fosse determinado um número mínimo de bases pré-existentes sendo utilizadas para que novas bases pudessem ser abertas. Sendo assim, chegou-se à conclusão de que pelo menos 20 bases pré-existentes deveriam ser abertas/utilizadas para, então, serem selecionadas e abertas a novas bases de despacho. Diante disso foram estabelecidos 21 pontos que representam as possíveis novas bases de despacho de veículos de resgate. Tal quantidade foi definida também em reuniões com o alto comando do CBMERJ e sua disposição geográfica será apresentada no próximo capítulo, na Figura 6.6.

No que tange aos custos, nessa aplicação real, para a estimativa do custo de abertura da base são considerados os recursos necessários para a construção de uma estrutura com cerca de 300 m². Não foi necessário incluir valores gastos na aquisição do terreno para a construção, tendo em vista que, geralmente, o governo municipal ou estadual realiza uma doação desses terrenos para o CBMERJ. Assim, estima-se que o custo de abertura da base (parâmetro δ_j do modelo matemático) seja de R\$ 500.000,00.

Vale destacar que, apesar do modelo matemático proporcionar a possibilidade de atribuir diferentes pesos aos tipos de ocorrências registradas, ocorrências do Tipo 1 e do Tipo 2, optou-se por manter o mesmo fator multiplicador para ambas as variáveis, ou seja, $W_1 = 1$ e $W_2 = 1$. Tal medida foi tomada tendo em vista que não foram fornecidas

informações suficientes sobre a Classificação Internacional de Doenças (CID) do atendimento, de forma que generalizações sobre maior ou menor gravidade da chamada podem ser especulativas e não devem ser feitas.

Outro parâmetro comum na definição dos cenários diz respeito ao cálculo do tempo de resposta do sistema EMS. Nesse sentido, a partir dos dados georreferenciados, o *software* TransCAD 5.0 (Caliper, 2008) foi utilizado para obtenção da matriz de tempo de deslocamento entre as bases e cada um dos setores censitários, por meio da rede rodoviária com atributos do comprimento e velocidade média de cada um dos arcos.

Como penalidades de alocação a uma base de despacho de veículos do tipo *dummy*, adotou-se valores suficientemente grandes para que estas só fossem utilizadas quando nenhuma outra base pudesse atender à demanda de determinado setor censitário. Portanto, estabeleceu-se como sanção de abertura e/ou utilização de uma base de despacho *dummy*, $K = 10^6$.

Ressalta-se, ainda, que está fora do escopo deste trabalho a realização de estudos específicos relacionados à composição dos custos de abertura e de utilização das bases de despacho de veículos de resgate. Dessa maneira, as estimativas adotadas, ainda que simplificadas, não interferem nas análises realizadas.

É importante frisar também que apesar do modelo matemático proposto ser visto como uma importante ferramenta de apoio ao processo de planejamento de serviços médicos de emergência, para sua efetiva aplicação em uma situação real, são necessárias algumas ponderações. A principal delas tange à necessidade de desenvolver estudos específicos para a composição dos referidos custos, de maneira que os parâmetros de entrada do modelo sejam adequados.

Feitas essas considerações e respeitados os parâmetros estipulados, os cenários propostos podem ser observados na Seção 5.2.2.

5.2.2 Definição dos cenários propostos

De forma geral, as proposições dos cenários ocorrem em função do número de locais candidatos a receber bases e do número de veículos utilizados. Como trata-se de uma aplicação real, foram considerados os locais com bases pré-existentes e novos locais candidatos com objetivo de auxiliar no planejamento de áreas de cobertura e melhorias no sistema de atendimento como um todo, como mencionado na Seção 5.2.1.

Assim sendo, os seguintes cenários foram estabelecidos:

- Cenário 1 – Este cenário representa a situação atual, podendo ser reconhecido como o cenário-base para comparação com os demais. Ele considera os 36 locais com bases pré-existentes do CBMERJ e disponibilidade de até 80 veículos de resgate. Nenhuma nova base de despacho pode ser aberta;
- Cenário 2 – Considera os 36 locais com bases pré-existentes, 21 novos locais candidatos e disponibilidade de até 80 veículos de resgate. Neste cenário podem ser abertas até 2 novas bases, desde que seja respeitada a quantidade mínima de 20 bases atuais abertas e utilizadas, conforme Seção 5.2.1;
- Cenário 3 – Consiste no Cenário 2 porém podem ser abertas até 3 novas bases de despacho;
- Cenário 4 – Consiste no Cenário 2 porém podem ser abertas até 4 novas bases de despacho;
- Cenário 5 – Consiste no Cenário 2 porém podem ser abertas até 5 novas bases de despacho;
- Cenário 6 – Consiste no Cenário 2 porém podem ser abertas até 10 novas bases de despacho;
- Cenário 7 – Após reuniões com o CBMERJ, verificou-se que havia a possibilidade de inclusão de cinco novos veículos de resgate à frota disponível. Diante disso, este cenário considera os 36 locais com bases pré-existentes, 21 novos locais candidatos e disponibilidade de até 85 veículos de resgate. Podem ser abertas até 2 novas bases, desde que seja respeitada, como nos demais cenários, a quantidade mínima de 20 bases atuais abertas e utilizadas;
- Cenário 8 – Consiste no Cenário 7 porém podem ser abertas até 3 novas bases de despacho;
- Cenário 9 – Consiste no Cenário 7 porém podem ser abertas até 4 novas bases de despacho;
- Cenário 10 – Consiste no Cenário 7 porém podem ser abertas até 5 novas bases de despacho; e
- Cenário 11 – Consiste no Cenário 7 porém podem ser abertas até 10 novas bases de despacho.

O Cenário 1 serviu de base, ainda, para análise e seleção de novos locais candidatos para receber novas bases de despacho. Tal análise levou em conta os setores censitários com população sem atendimento na atual cobertura do serviço. Foi feita uma comparação entre estas áreas e a concentração populacional do município de forma a indicar as áreas com maior deficiência de cobertura no cenário-base. Com isso, os pontos que representam as possíveis novas bases foram posicionados nas áreas de maior densidade populacional sem atendimento, de forma que o modelo pudesse escolher quais seriam os locais mais adequados para instalação dessas novas UBM.

A definição resumida dos cenários propostos pode ser observada na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Definição dos cenários de aplicação do modelo matemático proposto

Cenário	Bases de Despacho			Veículos de Resgate
	Pré-existentes	Disponíveis	Novas Abertas	
1	36	36	-	80
2	36	57	2	80
3	36	57	3	80
4	36	57	4	80
5	36	57	5	80
6	36	57	10	80
7	36	57	2	85
8	36	57	3	85
9	36	57	4	85
10	36	57	5	85
11	36	57	10	85

Com o auxílio da Tabela 5.4 percebe-se, então, que foram propostos três grupos de cenários: o primeiro é representado pelo cenário-base que indica a situação atual da cobertura de atendimento; o segundo grupo inclui os Cenários 2 a 6 e contempla alterações apenas na quantidade de bases utilizadas, permanecendo inalterada a quantidade de veículos de resgate; e, por fim, o terceiro grupo representado pelos Cenários 7 a 11, que propõem, além das variações no número de bases utilizadas, o incremento de cinco veículos de resgate a serem redistribuídos entre as bases.

5.3 Considerações Finais

Neste capítulo apresentou-se informações a respeito da área onde foi aplicado o estudo de caso, além de como foram conduzidas as aplicações, divididas em cenários, para a modelagem matemática proposta para localização de bases de despacho de veículos

de resgate. Com isso torna-se possível avaliar a complexidade do problema e a qualidade das soluções encontradas.

Primeiramente descreveu-se a área de estudo, o município do Rio de Janeiro sob diversos aspectos. Tal descrição foi complementada por duas diferentes análises: uma análise espacial e temporal das chamadas de emergência recebidas pelo CBMERJ; e uma análise estatística dos dados, com o objetivo de conhecer as variáveis explicativas para estes fenômenos.

A análise espacial indicou que 50% das chamadas concentram-se em apenas 23 bairros do município, especialmente nas áreas de planejamento 3 e 5, regiões de grande densidade populacional. Já a análise temporal destacou que o número mais relevante de chamadas é registrado nos meses de Janeiro, Setembro e Outubro, aos sábados, durante o intervalo entre 12:00 e 13:00 h. Destas ocorrências, cerca de 85% são do Tipo 1, que contempla infartos, fraturas, problemas respiratórios, entre outros tipos de enfermidades.

Quanto ao estudo das variáveis explicativas do problema, percebeu-se que estas sofrem diferenciações de acordo com o tipo de ocorrência. As variáveis capazes de explicar as ocorrências do Tipo 1 (ocorrências gerais) foram população residente e número de empregos formais. Já as ocorrências do Tipo 2 (acidentes de trânsito) podem ser explicadas por estas duas variáveis, além de número de estabelecimentos comerciais e comprimentos das vias, independente da velocidade permitida.

Frente a descrição detalhada da área de estudo, foram apresentados os cenários propostos para aplicações do modelo, assim como os parâmetros comuns adotados em todos eles, suas características e objetivos. Diante disso, no próximo capítulo são descritos os resultados encontrados para os referidos cenários.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta as análises dos resultados proporcionadas pelas aplicações do modelo matemático direcionadas ao município do Rio de Janeiro. Sendo assim, este capítulo está dividido, basicamente, em duas seções: (1) análise cenário a cenário dos resultados obtidos, com informações desagregadas por AP a respeito da cobertura em cada cenário, tempos médios de resposta e percentuais de utilização das bases; e (2) análise comparativa dos resultados obtidos pelos cenários, além de informações relativas aos tempos de processamento necessários para chegar aos resultados apresentados.

6.1 Análise dos Resultados Cenário a Cenário

Para resolução do modelo matemático de localização de bases de despacho de veículos de resgate proposto no Capítulo 4, aplicado aos 11 cenários definidos na Subseção 5.2, utilizou-se um computador equipado com processador AMD Phenom X4 1.9 GHz e 4 GB de memória RAM, com sistema operacional Windows 7 e *software* de otimização IBM ILOG CPLEX 12.6 (IBM, 2015). Como critério de parada para o software foi estipulado o parâmetro de *gap* igual a zero ou tempo máximo de execução igual a 10 minutos para cada cenário. Vale ressaltar, ainda, que a solução de cada cenário foi obtida a partir do zero, ou seja, não foram levados em conta resultados anteriores em qualquer dos testes.

Além disso, para construção do modelo matemático, foi desenvolvido um programa codificado em linguagem C/C++ que, a partir de arquivos com dados de entrada, gera arquivos de saída para serem resolvidos no CPLEX. Destaca-se que, sem um procedimento automatizado, tal como foi feito, a construção do modelo torna-se inviável de ser feita manualmente, devido ao tamanho dos problemas (cenários propostos) e quantidade de restrições envolvidas.

O resumo dos resultados para os 11 cenários propostos pode ser visualizado na Tabela 6.1. Foram utilizados como critérios de comparação entre os cenários, basicamente, a população atendida, a quantidade de bases de despacho de ambulâncias (bases existentes e novas bases) utilizadas e a quantidade de veículos empregados.

Já a Tabela 6.2 uma análise mais profunda relativa aos cenários propostos. Para tanto, foram avaliados como critérios de comparação os tempos de resposta em cada cenário, assim como o percentual de utilização das bases. O principal objetivo é verificar até que ponto o tempo de resposta é o grande limitante para o aumento da cobertura das bases.

Tabela 6.1 – Resumo dos resultados dos cenários

Cenário	População Atendida		Recursos Utilizados		
	Habitantes	%	Bases Atuais	Novas Bases	Veículos
1	5.223.785	82,7%	36	-	80
2	5.464.167	86,5%	33	2	80
3	5.527.106	87,5%	33	3	80
4	5.588.155	88,4%	33	4	80
5	5.629.323	89,1%	33	5	80
6	5.714.487	90,4%	33	10	80
7	5.464.167	86,5%	33	2	85
8	5.527.106	87,5%	33	3	85
9	5.588.155	88,4%	33	4	85
10	5.629.323	89,1%	33	5	85
11	5.714.487	90,4%	33	10	85

Tabela 6.2 – Tempo de resposta e utilização das bases por cenário proposto

Cenário	Tempo de Resposta (min)				Utilização das Bases (%)
	Médio	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Médio
1	5,43	2,78	8,51	1,43	71,9%
2	5,32	2,74	8,30	1,31	78,1%
3	5,34	2,63	8,26	1,29	80,0%
4	5,28	2,66	8,25	1,27	80,6%
5	5,31	2,65	8,26	1,24	81,3%
6	5,47	2,74	8,55	1,29	82,2%
7	5,31	2,61	8,27	1,33	72,8%
8	5,33	2,74	8,27	1,30	73,9%
9	5,30	2,71	8,23	1,26	75,6%
10	5,33	2,63	8,27	1,26	75,9%
11	5,25	2,71	8,30	1,21	75,5%

Informações completas a respeito do percentual de utilização de cada base em cada um dos cenários, bem como o nome atribuído a essas bases e as áreas de planejamento em que estão localizadas, podem ser visualizadas no Apêndice A.

Nas subseções a seguir são apresentadas, separadamente, as análises dos resultados para os cenários definidos na Seção 5.2. Nesta etapa a análise é feita cenário a cenário com o intuito de oferecer informações mais completas a respeito dos resultados alcançados com a utilização do modelo matemático.

6.1.1 Resultados do Cenário 1

No Cenário 1, os parâmetros adotados permitem uma avaliação do atual nível de cobertura das bases de despacho do CBMERJ, principalmente no que se refere à distribuição das UBM ao longo do território e dos veículos de resgate alocados a essas

unidades. Tal fato possibilita uma análise mais aprofundada a respeito das regiões atualmente descobertas, assim como norteia a distribuição de pontos que representam as possíveis novas localizações de bases operacionais.

Como é possível observar na Tabela 6.1, atualmente o percentual de cobertura oferecido pelas bases de despacho de veículos do CBMERJ está próximo dos 82,7% da população. Isso significa que quase 1,1 milhão de pessoas (17,3% do total da população) estão fora do raio de cobertura que considera o tempo de resposta de, no máximo, 10 minutos, almejado por este sistema EMS. A Figura 6.1 apresenta o mapa do município do Rio de Janeiro com a delimitação das áreas consideradas cobertas pelo serviço ofertado no Cenário 1. Para tanto, foram utilizados os 80 veículos de resgate disponíveis e as 36 bases de despacho pré-existentes.

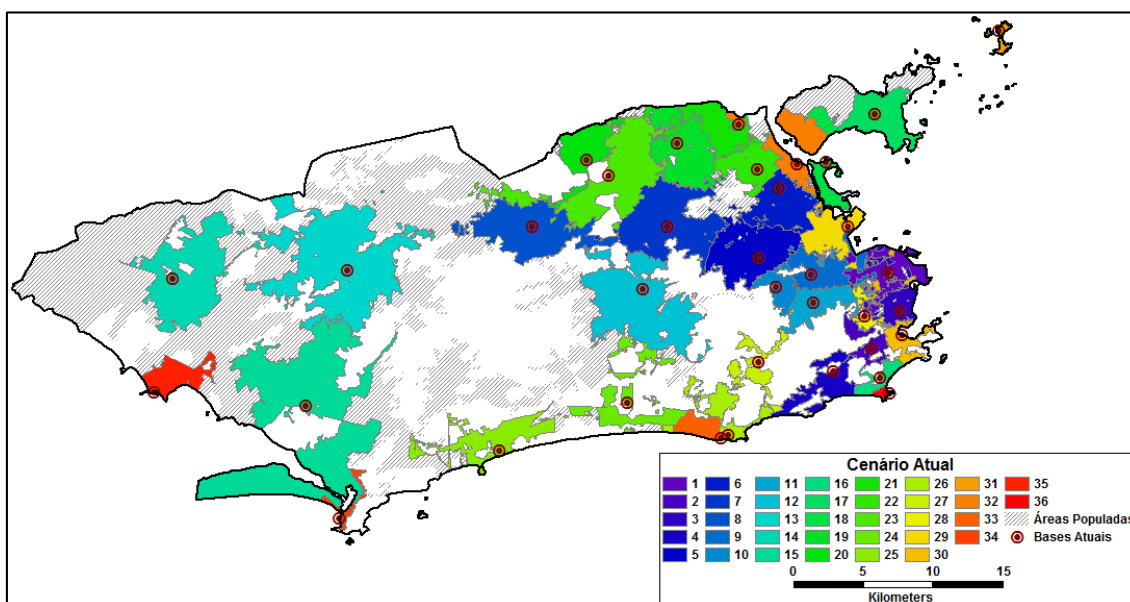


Figura 6.1 – Áreas de cobertura das 36 bases utilizadas no Cenário 1

Diante desta figura, percebe-se que o maior percentual de setores censitários com população sem atendimento no tempo estipulado está localizado nas AP 4 e AP 5, na região oeste do município, indicando uma possível carência da população neste sentido. Tal situação pode ser justificada pelo recente desenvolvimento destas áreas, que vêm passando por um forte adensamento populacional nos últimos anos e que não é seguido pelo mesmo nível de planejamento e oferta de serviços públicos.

Apesar disso, não é possível afirmar apenas pelo mapa, que indica a cobertura dos setores censitários, qual o maior limitante para o aumento das áreas atendidas no tempo

pré-determinado. Diversos fatores podem ser responsáveis pela falta de cobertura em certas áreas, os principais deles são: (i) a localização das bases, que podem estar muito afastadas dos pontos de demanda, fazendo com que a equipe de resgate não tenha tempo hábil para chegar ao local da chamada nos padrões exigidos; e (ii) a capacidade de atendimento dessas bases, que pode estar esgotada ou próximo disso, de forma que, mesmo que haja tempo suficiente para a chegada da equipe, não hajam veículos e recursos humanos disponíveis para o resgate.

Os dados disponibilizados na Tabela 6.2, referentes ao tempo de resposta e ao percentual de utilização das bases, são capazes de fornecer um maior número de elementos para o complemento da análise de cobertura. De forma geral, o tempo médio de resposta do serviço no Cenário 1 é de 5,43 minutos, sendo que o atendimento com maior tempo de espera ocorreu em 8,51 minutos e o mais rápido em 2,78 minutos. Tais parâmetros podem ser considerados adequados para o atendimento por estarem próximos do tempo máximo de resposta estipulado pelo CBMERJ, no entanto, para este caso o tempo não é um limitante para a cobertura. Sendo assim, a operação pode estar sendo prejudicada pela capacidade do sistema, ou ainda, pela sobreposição de raios de cobertura em algumas áreas, enquanto em outras o número de bases é insuficiente.

Apesar dos indícios de sobreposição de raios de cobertura, especialmente no Centro e na Zona Sul, outro dado da Tabela 6.2 aponta para o elevado percentual médio de utilização das bases neste cenário (71,9%). Tais elementos apontam que grande parte das bases de despacho têm operado próximo da capacidade máxima, o que mostra-se extremamente preocupante do ponto de vista de mão de obra, devido ao grande desgaste (físico e psicológico) a que os trabalhadores são expostos quando não lhes é garantido o descanso necessário entre um atendimento e outro.

Como forma de avaliar a situação nas diferentes áreas de planejamento, o gráfico da Figura 6.2 apresenta de maneira desagregada os tempos médios de resposta das bases de despacho de veículos de resgate no Rio de Janeiro.

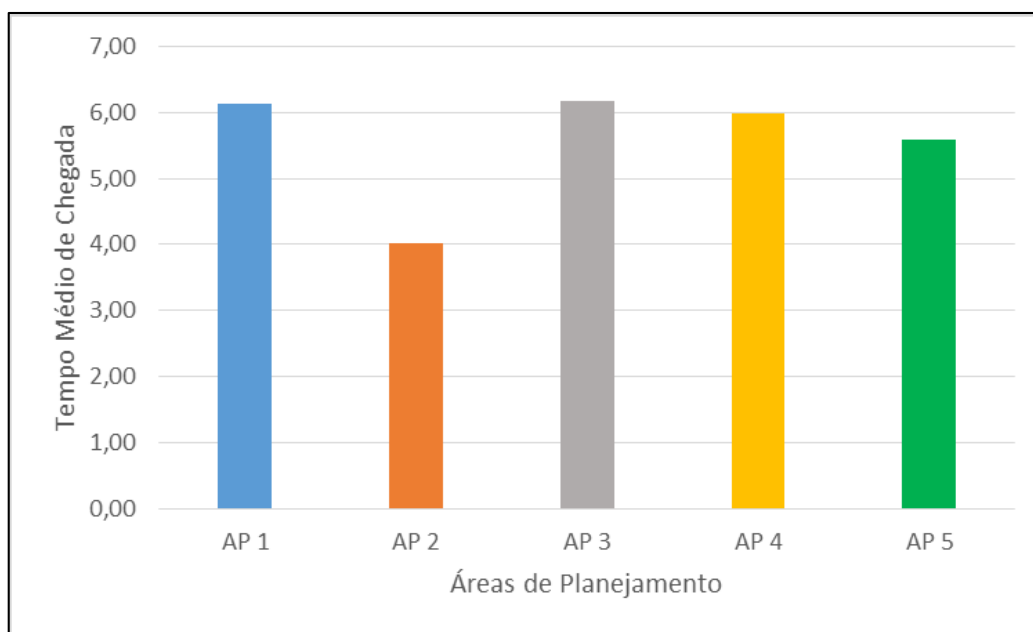


Figura 6.2 – Tempo médio de resposta das bases no Cenário 1 por AP

Como é possível observar, a AP 2 (Zona Sul) é a região que apresenta o menor tempo médio de resposta, próximo dos 4 minutos. Nesta área, há uma grande possibilidade de haver sobreposição dos raios de cobertura, tendo em vista, principalmente, a proximidade das bases pré-existentes. O oposto é percebido nas demais AP, apesar do maior tempo médio de resposta estar próximo dos 6 minutos. Tal situação pode ser notada na AP 1, que representa a região central do município, em decorrência do baixo número de bases distribuídas por aquela região. Já na Zona Norte (AP 3), a grande extensão territorial, aliada à alta densidade demográfica se mostram como fatores determinantes para o maior número de chamadas e consequente maior espera por atendimento, uma vez que, como pode-se observar na Tabela A.1, os percentuais de utilização das bases nesta região são elevados.

No que se refere ao tempo médio de atendimento nas AP 4 e AP 5, como essas áreas não são contempladas com um grande número de bases, espera-se que o percentual de utilização delas seja elevado, sendo o maior determinante para a limitação da cobertura (Tabela A.1 do Apêndice A).

Como complemento à avaliação proposta pela Figura 6.2, o gráfico da Figura 6.3 apresenta os tempos máximos de resposta desagregados por AP. Neste caso, as Zonas Sul e Oeste, incluindo a região da Barra da Tijuca e Jacarepaguá, apresentam-se no mesmo patamar, com tempo máximo inferior a 6,5 minutos, o que corrobora com as afirmativas anteriores quanto à sobreposição de raios de cobertura e elevado percentual de utilização

das bases. Enquanto isso, AP 1 e AP 3 exibem tempos máximos entre 8 e 9 minutos, indicando a necessidade de uma análise mais aprofundada da situação, como a comparação de diferentes cenários.

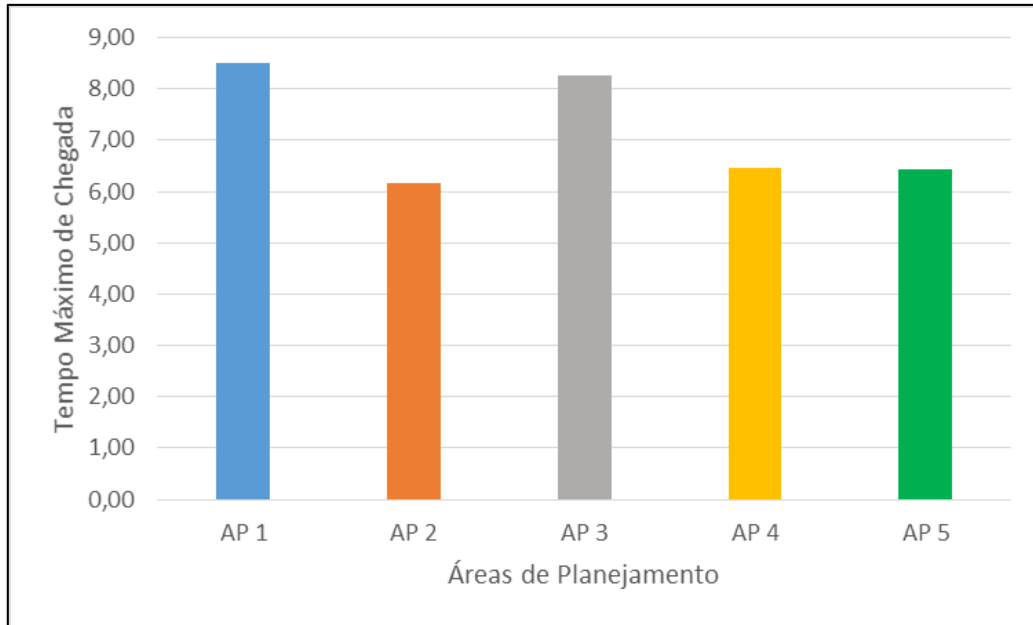


Figura 6.3 – Tempo máximo de resposta das bases no Cenário 1 por AP

Outro fator de grande importância diz respeito à quantidade de veículos de resgate alocados a cada base. Tal fator é abordado de maneira integrada no gráfico da Figura 6.4.

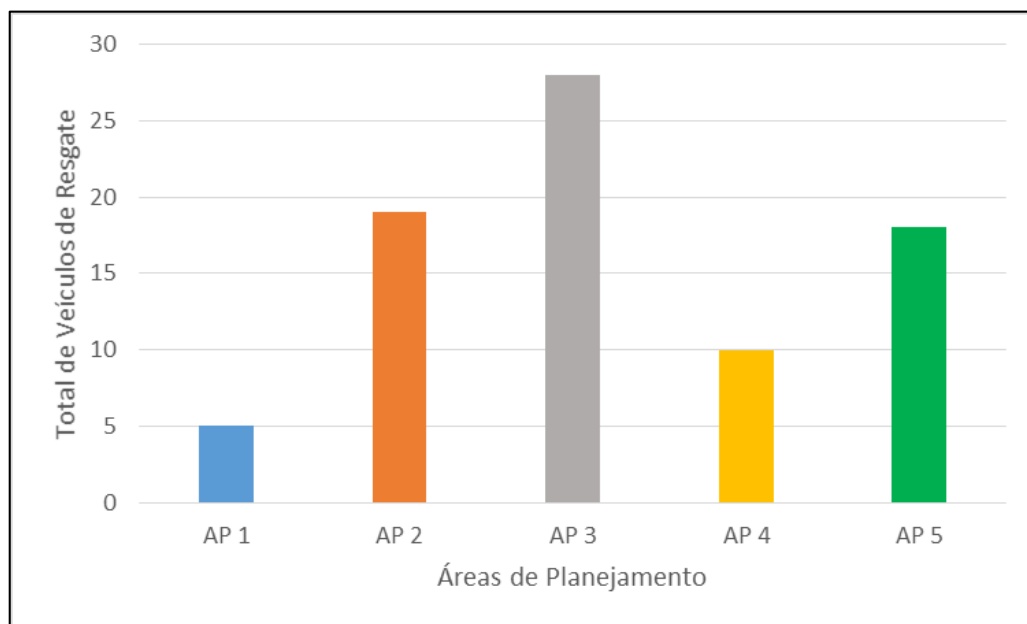


Figura 6.4 – Quantidade de veículos de resgate por AP no Cenário 1

Percebe-se que maior parcela dos veículos de resgate está alocado às bases de despacho no território da AP 3, o que reforça a tese de que, apesar da grande disponibilidade do serviço nesta região, a demanda por atendimento também é bastante elevada, o que reduz a eficiência da operação. Já na AP 1, verifica-se o menor número de veículos, no entanto, o atendimento não é comprometido, tendo em vista que se mantém no tempo de resposta estabelecido e com efetiva cobertura de seus pontos de demanda. Sendo assim, o aumento da disponibilidade de bases ou veículos nesta região é recomendado apenas com o objetivo de reduzir os percentuais de utilização das bases.

Já na região das AP 4 e AP 5, nota-se um reduzido número de veículos disponíveis, assim como de bases operacionais, fatores limitantes para a expansão do serviço e cumprimento dos parâmetros estabelecidos na região. Frente aos resultados obtidos neste cenário, observa-se a relevância de buscar pontos estratégicos para dispor as possíveis novas bases de despacho de veículos de resgate. Partindo desta necessidade, avaliou-se com maior profundidade as áreas do município com população e sem cobertura de EMS em até 10 minutos (Figura 6.5).

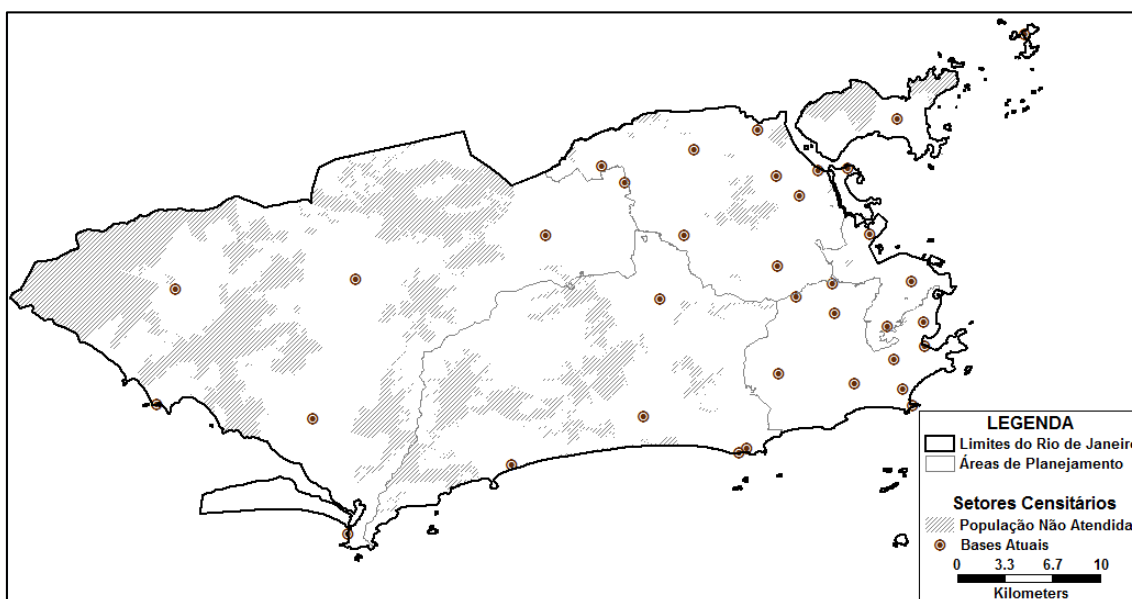


Figura 6.5 – Setores censitários com população sem atendimento no Cenário 1

Com base nessas primeiras informações sobre a parcela da população fora da cobertura do EMS em um raio de 10 minutos, é possível notar que a maior concentração de setores censitários descobertos se encontra nas AP 4 e AP 5, com uma pequena contribuição da Zona Norte, em especial a região da Ilha do Governador. No entanto, não

basta apenas saber qual o setor não está coberto, mas também quão denso este setor é em termos de população. Diante disso, elaborou-se um mapa da densidade populacional dos setores não cobertos onde foram distribuídos possíveis novos pontos de bases de despacho de veículos de resgate (Figura 6.6).

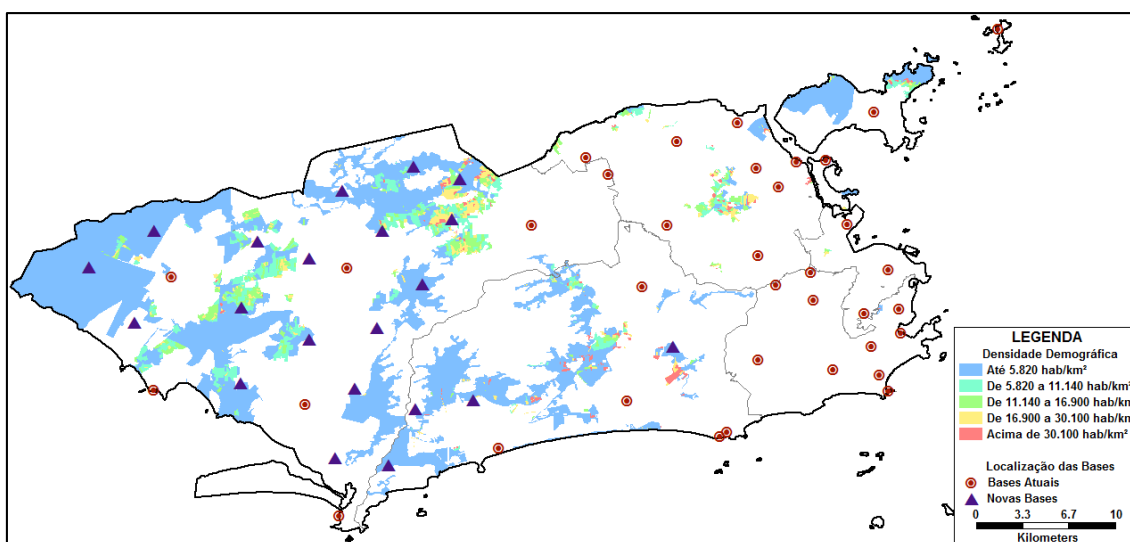


Figura 6.6 – Densidade demográfica dos setores censitários não atendidos e localização das possíveis novas bases operacionais.

A disposição das 21 possíveis novas bases de despacho apresentada na Figura 6.6 foi utilizada nos demais cenários com o intuito de oferecer liberdade ao modelo matemático para que sejam escolhidas as localizações mais adequadas.

6.1.2 Resultados do Cenário 2

No Cenário 2, ao considerar como parâmetros de entrada dados de localização das duas possíveis novas bases de despacho, espera-se que o modelo matemático proposto possa ser utilizado como ferramenta de apoio gerencial na escolha otimizada de bases operacionais que realizem o despacho de veículos de resgate. Tal situação possibilita, ainda, uma comparação entre o Cenário 2 e o Cenário 1.

Como pode ser observado na Tabela 6.1, o percentual de cobertura do sistema sofreu um incremento em relação ao cenário-base. Com a utilização de mais duas bases, o total de habitantes atendidos pelo EMS passou para 5.464.167 pessoas. Apesar da inserção das novas bases neste cenário, verificou-se que 3 pré-existentes deixaram de ser utilizadas, o que configura o uso efetivo de 35 bases de despacho, número inferior ao apresentado no Cenário 1. A Figura 6.7 apresenta o mapa do município do Rio de Janeiro

com a delimitação das áreas atendidas em até 10 minutos pelo serviço ofertado no Cenário 2.

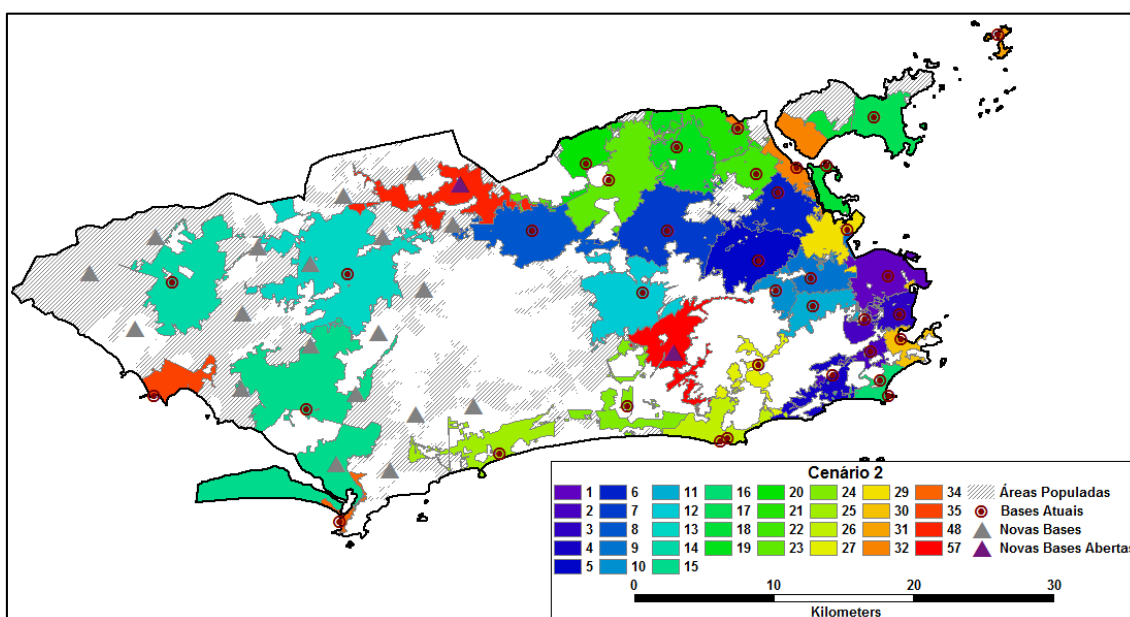


Figura 6.7 – Áreas de cobertura das 35 bases utilizadas no Cenário 2

É possível notar que, apesar da inclusão de uma nova base na AP 4 e outra na AP 5, o maior percentual de setores censitários com população sem atendimento no tempo estipulado continua localizado nestas áreas de planejamento. No entanto, é importante ressaltar que houve um aumento considerável na cobertura do sistema, sem elevar a quantidade de veículos utilizados e reduzindo o número efetivo de bases. Diante disso, reforça-se a tese de que haveria uma sobreposição de raios de cobertura em determinadas regiões do município.

Quanto às bases pré-existentes que deixaram de ser utilizadas, percebe-se que elas estavam localizadas em diferentes áreas de planejamento (AP 1, AP 2 e AP 4). É possível verificar, ainda, que o padrão de cobertura não foi reduzido nestes locais, tendo em vista que não surgiram novos pontos sem cobertura em áreas anteriormente cobertas, ou seja, possivelmente estas bases estavam localizadas em áreas de sobreposição.

De acordo com a Tabela 6.2, o tempo médio de resposta às chamadas no Cenário 2 foi de 5,32 minutos, inferior ao do cenário-base. Além disso, o tempo mínimo de espera por atendimento foi de apenas 2,74 minutos, enquanto o maior tempo de resposta foi de 8,3 minutos. Aparentemente, o tempo não se mostra um fator restritivo ao aumento de cobertura, assim como no Cenário 1.

Com o objetivo de comparar a situação nas diferentes áreas de planejamento, o gráfico da Figura 6.8 apresenta de maneira desagregada os tempos médios de resposta das bases de despacho de veículos de resgate no Rio de Janeiro.

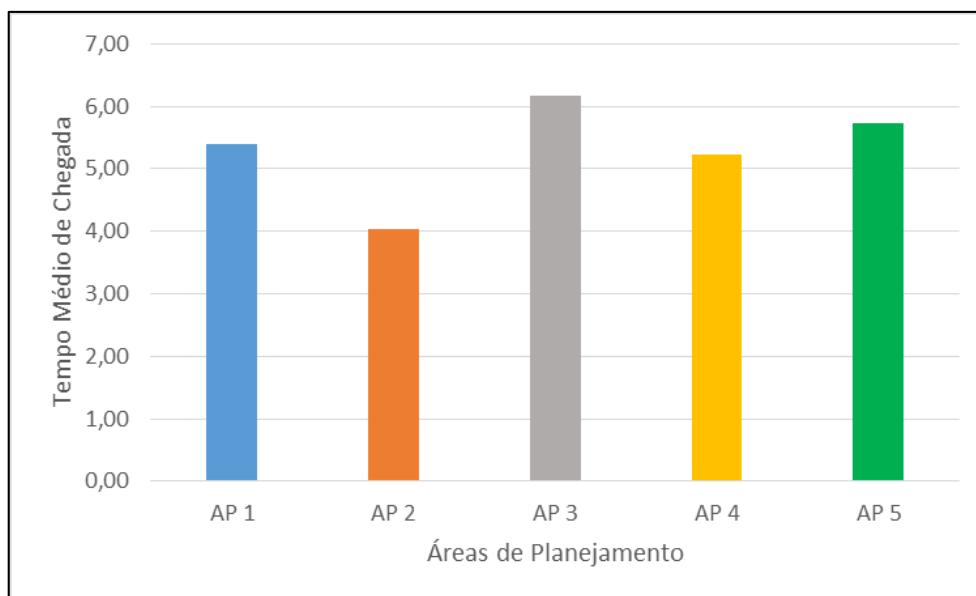


Figura 6.8 – Tempo médio de resposta das bases no Cenário 2 por AP

Novamente a Zona Sul (AP 2) apresenta o tempo médio de resposta próximo dos 4 minutos, inferior ao das demais regiões, que estão acima dos 5 minutos. Com exceção da AP 3, houve uma redução geral neste tempo de espera por atendimento nas áreas de planejamento. A exemplo disto, a AP 4 passou a exibir o segundo menor tempo médio, possivelmente em função da inclusão de uma nova base estrategicamente localizada em um ponto de grande densidade demográfica, o qual se mostrava parcialmente descoberto no Cenário 1.

Anteriormente (Cenário 1), nesta mesma área onde o modelo apontou a necessidade de abertura da nova base, a cobertura parcial foi possibilitada por uma base a uma distância considerável dos locais de demanda. Com isso, nota-se que a redução nestes deslocamentos das equipes é capaz de exercer influência direta sobre o tempo de resposta. O mesmo pode ser dito em relação à base escolhida para abertura na AP 5, que também diminuiu os espaços entre os pontos de demanda e a base designada para atendimento.

O gráfico da Figura 6.9, por sua vez, em complemento às informações supracitadas, apresenta os tempos máximos de resposta desagregados por AP. Corroborando com a importância da abertura de uma nova base na AP 4, esta região foi

a que apresentou o menor tempo de resposta entre todas as outras, inclusive menor do que o registrado no Cenário 1. Apenas a AP 3 sofreu um leve incremento neste quesito, o que aponta para a necessidade de avaliação de seu percentual de utilização das bases.

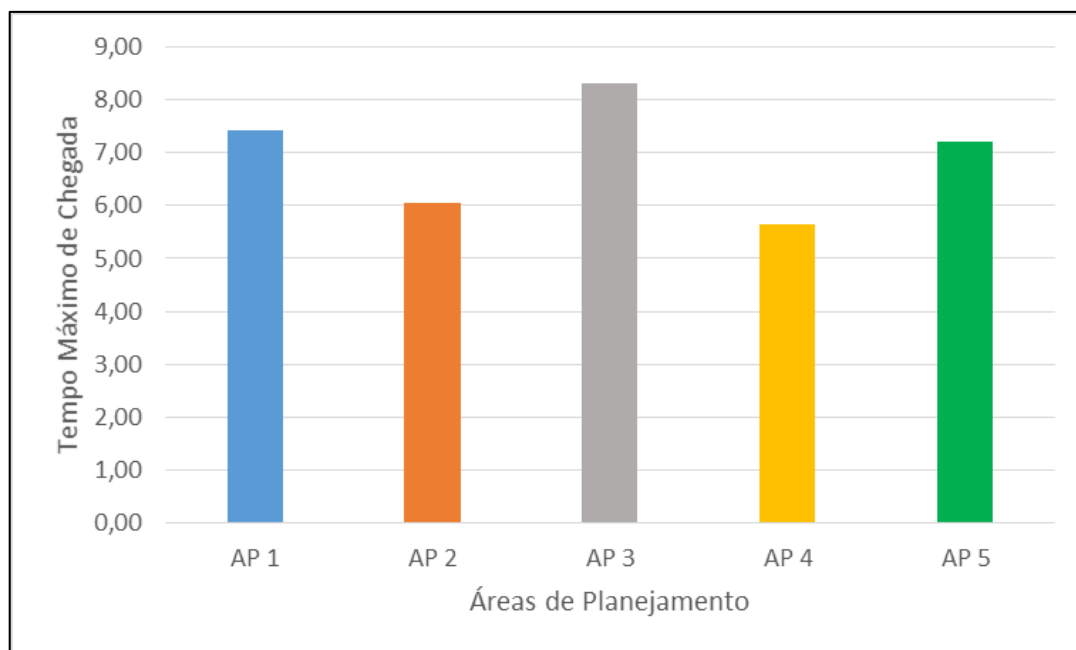


Figura 6.9 – Tempo máximo de resposta das bases no Cenário 2 por AP

De acordo com a Tabela 6.2, apesar dessas reduções observadas nos tempos de resposta, nota-se um acréscimo considerável no percentual de utilização das bases. O percentual médio de utilização das bases chegou aos 78,1%. Acredita-se que este tão relevante aumento possa ser atribuído à redução da quantidade total de bases utilizadas para atendimento de chamadas, de 36 para 35 locais de despacho de veículos, de forma a fundamentar o aumento da população atendida.

Outra questão de relevância, apresentada no gráfico da Figura 6.10, inclui a quantidade de veículos de resgate alocados a cada base. Diante desta figura é possível perceber que se manteve o mesmo padrão de distribuição de veículos de resgate sobre o território das áreas de planejamento. Nota-se que a maior parcela dos veículos continua alocada às bases de despacho no território da AP 3, reforçando a tese de elevada demanda da região. O menor número de veículos também permaneceu na AP 1, o que pode ser reflexo da pequena possibilidade de mudanças associadas a esta região, caracterizada pelas baixas capacidades das bases ali localizadas, tendo em vista sua intensa ocupação residencial e, principalmente, comercial.

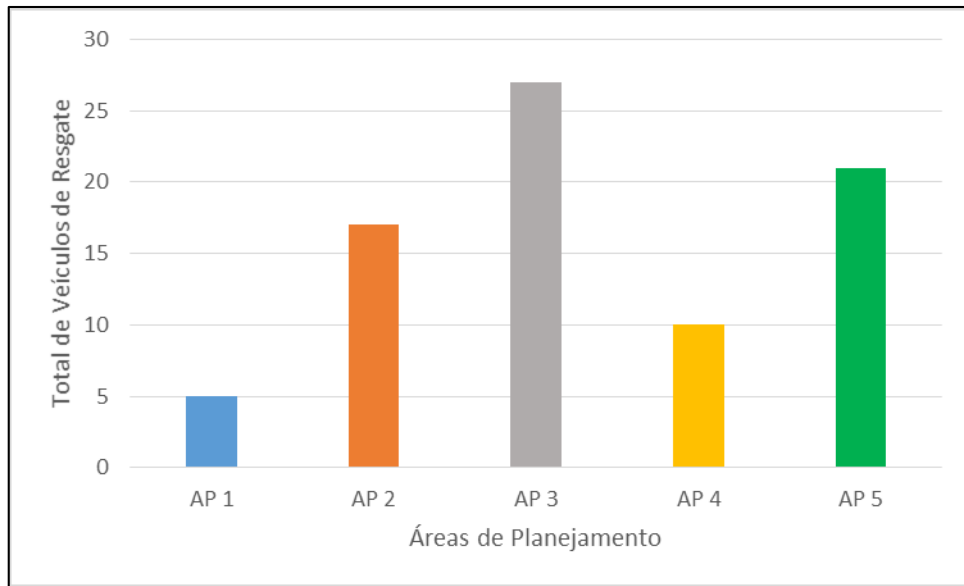


Figura 6.10 – Quantidade de veículos de resgate por AP no Cenário 2

A área de planejamento que apresentou o crescimento mais expressivo na quantidade de veículos foi a AP 5, que passou de 18 para 21 ambulâncias. Pode-se atribuir este aumento da frota nesta região não apenas à abertura da nova base, mas principalmente à reorganização na alocação dos veículos com o objetivo de posicionar o maior número possível de ambulâncias em uma dada região com grande demanda concentrada.

6.1.3 Resultados do Cenário 3

Quanto ao Cenário 3, no mesmo sentido do Cenário 2, busca-se avaliar os benefícios gerados por uma pequena alteração na configuração das bases de despacho. Neste caso, a proposta de inclusão de até três novas bases resultou em uma elevação próxima dos 5% na população atendida (cerca de 303 mil habitantes), em relação ao cenário-base, ainda com a utilização de 80 veículos de resgate.

De maneira similar ao observado no Cenário 2, deixaram de ser utilizadas 3 bases pré-existentes, em Santa Teresa (AP 1), Copacabana (AP 2) e na Barra da Tijuca (AP 4), em decorrência da abertura das 3 novas bases. Como pode-se perceber na Figura 6.11, essas novas unidades foram abertas da seguinte forma: uma na região da AP 4, próximo à Jacarepaguá, como no Cenário 2; e duas na AP 5, uma no mesmo local de abertura do Cenário 2 e a outra mais ao extremo oeste do município, no bairro de Santa Cruz. Com isso, foram efetivamente utilizadas 36 bases de despacho e 80 veículos, como no cenário-base, porém, com uma relevante diferença nos índices de cobertura.

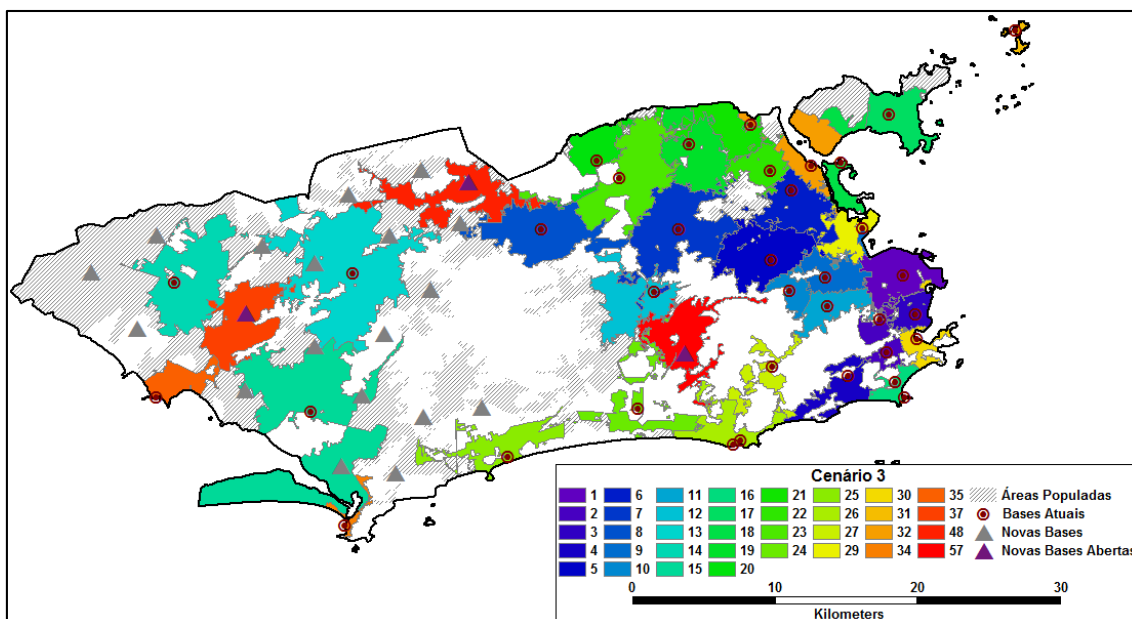


Figura 6.11 – Áreas de cobertura das 36 bases utilizadas no Cenário 3

É possível notar que o maior ganho em cobertura populacional deste cenário foi obtido pela terceira base localizada em Santa Cruz, tendo em vista que nos cenários anteriores a região que faz parte do raio de cobertura daquela base mostrava-se descoberta para o tempo de resposta de até 10 minutos. Apesar disso, ainda permanece alto o número de setores censitários descobertos nas AP 4 e AP 5.

Já de acordo com a Tabela 6.2, o tempo médio de resposta às chamadas no Cenário 3 foi de 5,34 minutos, levemente superior ao registrado no Cenário 2. No entanto, os tempos máximo e mínimo de espera por atendimento foram reduzidos para 8,26 e 2,63 minutos, respectivamente, assim como o desvio padrão passou de 1,43 no cenário-base para 1,29. Além disso, outra informação importante desta tabela trata do percentual de utilização das bases, que novamente sofreu uma elevação, apresentando média de 80,0% de utilização das bases. Portanto, mais uma vez, a capacidade de atendimento das UBM mostra-se mais limitante ao crescimento da cobertura do que o tempo de resposta do sistema.

Para comparar a situação nas diferentes áreas de planejamento, o gráfico da Figura 6.12 apresenta os tempos médios de resposta das bases de despacho de veículos de resgate de maneira desagregada para o Rio de Janeiro.

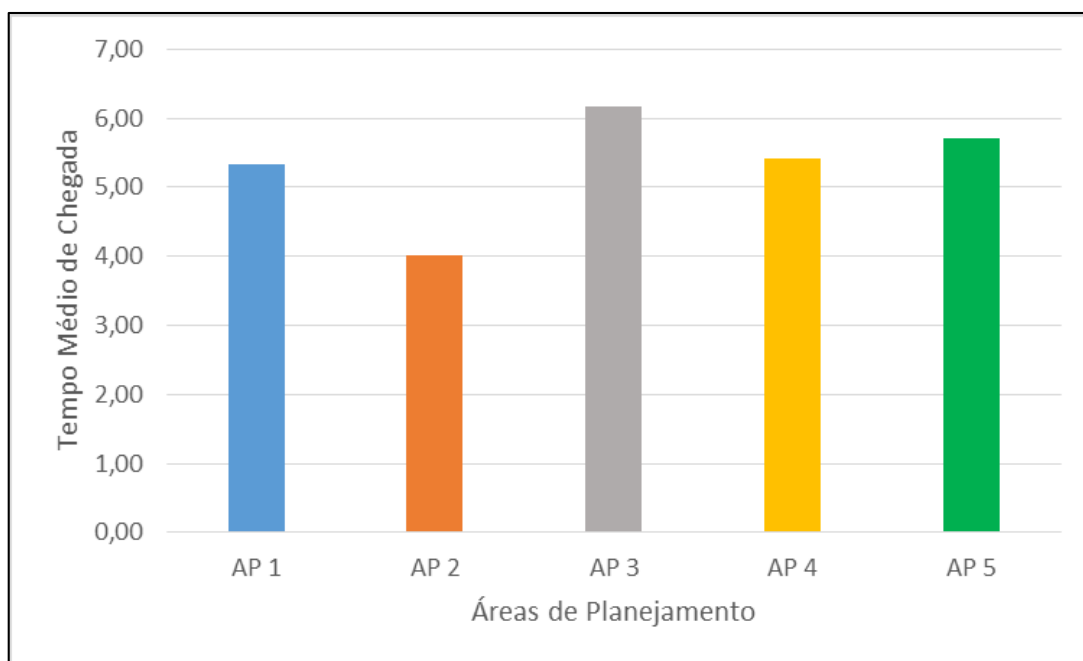


Figura 6.12 – Tempo médio de resposta das bases no Cenário 3 por AP

Os resultados apontados na figura mostram grande similaridade entre os tempos médios de chegada para atendimento nos Cenários 2 e 3. Novamente a Zona Sul (AP 2) manteve o menor tempo médio de resposta, próximo dos 4 minutos, enquanto as demais regiões registram tempos acima dos 5 minutos. As AP 1 e AP 4 seguiram com redução significativa em relação ao cenário-base, enquanto a AP 5 apresentou um ligeiro aumento em relação ao mesmo cenário. Tal situação pode ser resultado da inclusão da terceira nova base com raio de cobertura relativamente extenso em um local descoberto nos cenários anteriores.

Já o gráfico da Figura 6.13, em complemento às informações anteriores, apresenta os tempos máximos de resposta desagregados por AP. Mais uma vez observa-se o mesmo comportamento do Cenário 2. A AP 4 manteve-se como a área de planejamento com menor tempo máximo de espera pela chegada da equipe, no entanto, tal valor foi superior ao registrado pela mesma AP no cenário anterior. A região que até o momento mostra-se sempre bem servida pelo CBMERJ é a Zona Sul (AP 2), uma vez que ela sempre está entre os menores tempos de resposta, com considerável número de veículos alocados a ela, entre outros aspectos.

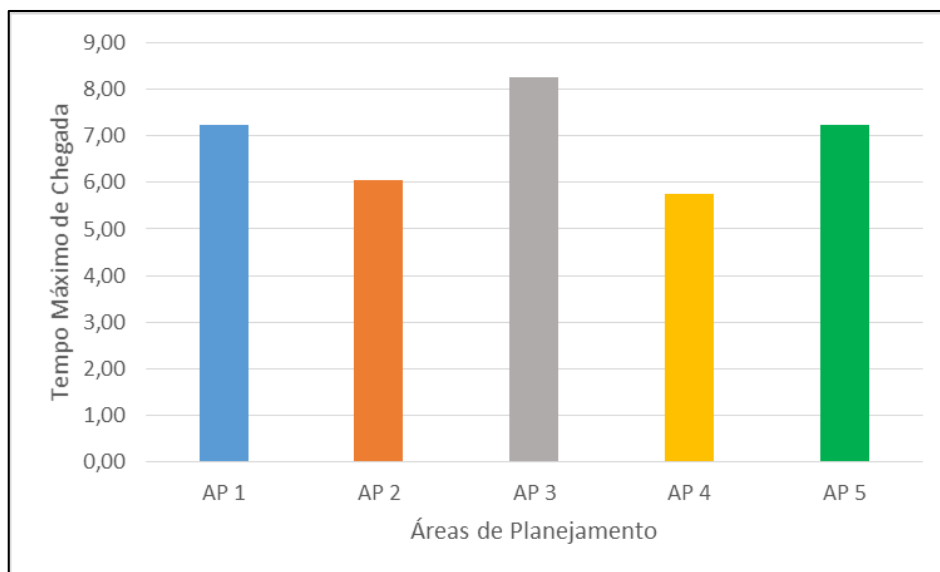


Figura 6.13 – Tempo máximo de resposta das bases no Cenário 3 por AP

Além disso, analisou-se também o tempo mínimo de resposta para o Cenário 3. O gráfico da Figura 6.14 indica que, especialmente na região oeste do município, nas AP 4 e AP 5, há uma grande disparidade em relação à diferença dos tempos mínimo e máximo de espera por atendimento. Enquanto a AP 4 apresenta o menor valor diferença, inferior a 1 minuto, a AP 5 apresenta mais de 4 minutos de diferenças entre o menor e o maior tempo de resposta. Tal fato pode estar relacionado, tanto às características da demanda, que pode estar mais concentrada em uma determinada região como uma via com altos índices de acidentes ou uma região com grande número de idosos ou acamados, quanto aos fatores limitantes de cobertura (tempo de deslocamento e capacidade das bases).

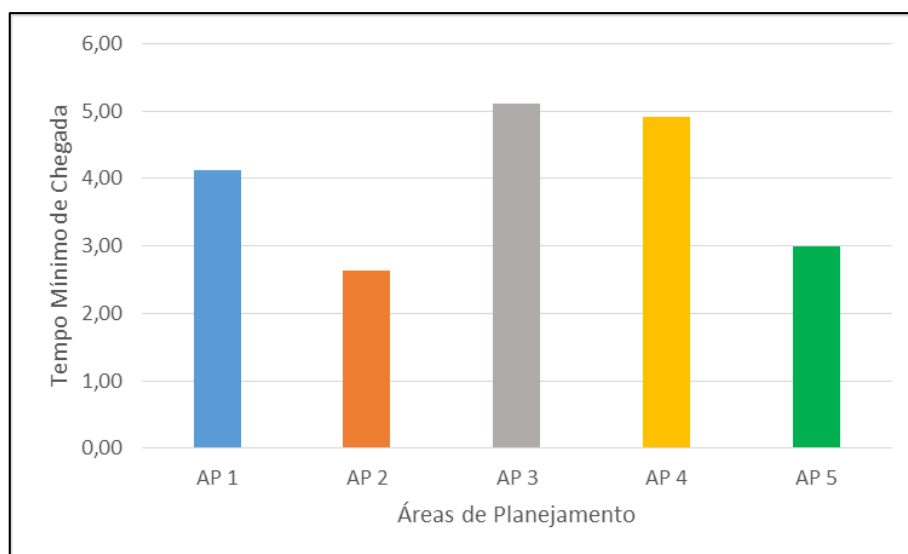


Figura 6.14 – Tempo mínimo de resposta das bases no Cenário 3 por AP

Tendo em vista que foi registrado um alto percentual médio de utilização das bases, possivelmente, a capacidade de atendimento em áreas como a AP 4 seja um fator mais importante do que o tempo, enquanto na AP 5 podem haver bases com disponibilidade de capacidade para atendimento, porém com demandas mais dispersas pelo território. Já as demais regiões apresentam padrões próximos de variação, entre 2,5 e 3,0 minutos.

No que tange a quantidade de veículos de resgate disponibilizados para cada AP, o gráfico da Figura 6.15 aborda este assunto de maneira desagregada. Como é possível verificar, o padrão de distribuição de veículos sobre o território das áreas de planejamento manteve-se próximo dos cenários anteriores. Foram alocados mais um veículo para as AP 2 e AP 5, enquanto a AP 3 manteve-se com a mesma quantidade do Cenário 2 e as demais tiveram uma ambulância realocada cada. Ainda assim, a maior parcela dos veículos permanece alocada às bases de despacho no território da AP 3, devido à elevada demanda da região por atendimentos de urgência/emergência.

Diante do apresentado, acredita-se que tal cenário possa ser considerado de grande representatividade para o planejamento deste EMS, tendo em vista a necessidade de investimentos não muito grandes de forma a melhorar expressivamente os níveis de cobertura das bases de despacho.

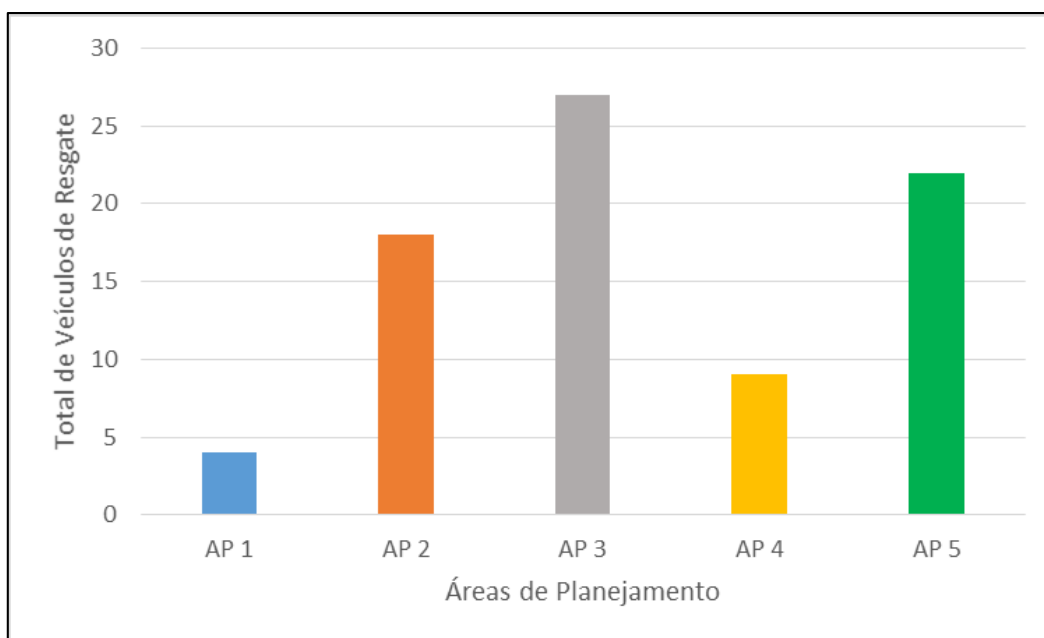


Figura 6.15 – Quantidade de veículos de resgate por AP no Cenário 3

6.1.4 Resultados do Cenário 4

A situação proposta pelo Cenário 4 propicia uma comparação entre o cenário-base (Cenário 1) e uma variação de maior proporção com a possibilidade de abertura de até quatro novas bases, permanecendo com os 80 veículos de resgate.

Pela Tabela 6.1 pode-se notar que a cobertura total do sistema cumpriu com sua expectativa de crescimento, chegando ao patamar dos 5.588.155 habitantes, cerca de 88,4% da população do município. O aumento em relação ao cenário-base (cerca de 5,7%) representa um ganho de mais de 360 mil pessoas. Para tanto, foi estabelecido que poderiam ser abertas e utilizadas até mais 4 bases de despacho ao longo do território. Como nos cenários anteriores, a aberturas dessas quatro novas bases implicou na descontinuidade da utilização das mesmas três bases apontadas anteriormente, fazendo com que 37 bases fossem efetivamente utilizadas para o atendimento da demanda no Cenário 4.

Diante disso, a Figura 6.16 apresenta o mapa do município do Rio de Janeiro com a delimitação das áreas cobertas em até 10 minutos das 37 bases utilizadas no Cenário 4, com disponibilidade de 80 veículos de resgate.

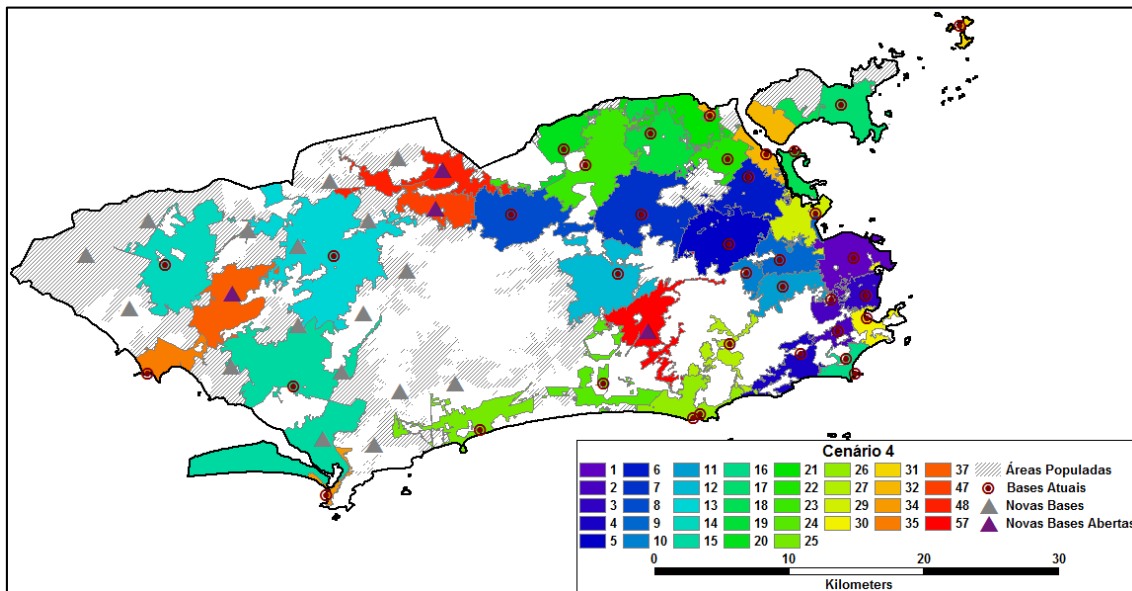


Figura 6.16 – Áreas de cobertura das 37 bases utilizadas no Cenário 4

Mesmo com a inserção de quatro bases de despacho nas AP 4 e AP 5, a última posicionada nas proximidades de Bangu, pode-se observar que esta é a região que permanece com o maior percentual de setores censitários sem atendimento no tempo de resposta de 10 minutos. No entanto, é importante ressaltar que o considerável aumento na cobertura do

sistema, sem alteração no número de veículos disponíveis, pode ser efetivamente comprovado nesta mesma região a partir da comparação dos mapas das Figuras 6.1 e 6.16.

Ao observar que as bases pré-existentes que deixaram de ser utilizadas mantêm-se as mesmas desde o Cenário 2 é possível confirmar que havia um problema de sobreposição de determinadas áreas de cobertura. Apesar de uma dessas bases estar localizada na AP 4, região com grandes limitações de cobertura, percebe-se que ainda assim ela estava localizada muito próxima de outra base, não representando resultados expressivos quanto ao seu raio de cobertura. É possível comprovar tal fato diante da manutenção ou mesmo expansão do atual padrão de cobertura nestes locais, tendo em vista que não surgiram novos pontos de demanda sem cobertura em áreas anteriormente cobertas.

Com pode-se observar na Tabela 6.2, o tempo médio de resposta às chamadas no Cenário 4 foi de 5,28 minutos, o menor registrado entre os cenários apresentados até o momento. Além disso, o tempo mínimo de espera por atendimento também manteve-se entre os mais baixos, com apenas 2,66 minutos de espera. Já o tempo máximo de resposta apontado foi de 8,25 minutos. Na Figura 6.17 podem ser observados, separadamente para cada AP os tempos médios de chegada dos veículos de resgate ao local de atendimento.

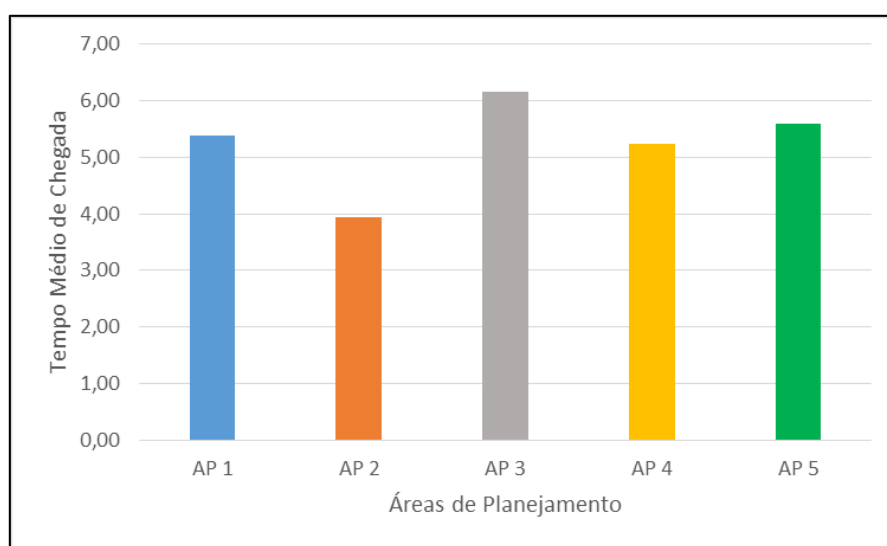


Figura 6.17 – Tempo médio de resposta das bases no Cenário 4 por AP

Mais uma vez os resultados apontados na figura mostram grande similaridade entre os tempos médios de chegada para atendimento em relação aos cenários anteriores. Novamente a AP 2 é a que apresenta o menor tempo médio de resposta, próximo dos 4 minutos, enquanto nas demais regiões este tempo varia entre 5 e 6 minutos,

aproximadamente. A AP 3, que representa a Zona Norte do município, também permaneceu como a com maior tempo médio de resposta, devido à grande demanda por atendimento concentrada nesta região do município. Vale ressaltar que esta região é cercada por importantes vias de ligação entre o Rio de Janeiro e os municípios da Baixada Fluminense, tornando-se um elo de passagem para moradores de ambos os municípios. Além disso, tal região configura-se como um dos principais polos de atração de emprego da Região Metropolitana do Rio de Janeiro.

A abertura de novas bases de despacho indicadas pelo modelo matemático mostra-se como o principal fator responsável pela redução dos tempos médios de espera por atendimento. A redução dos deslocamentos possibilitada por esta alteração revela-se capaz de influenciar positivamente o tempo de resposta, uma vez que as bases de despacho tornaram-se mais próximas dos locais de demanda.

O gráfico da Figura 6.18, por sua vez, em complemento às informações supracitadas, apresenta os tempos máximos de resposta desagregados por AP. Corroborando com a importância da abertura de novas bases nas AP 4 e AP 5, estas regiões, juntamente com a AP 1, foram as que apresentaram a redução mais significativa no tempo máximo de resposta em relação ao Cenário 1.

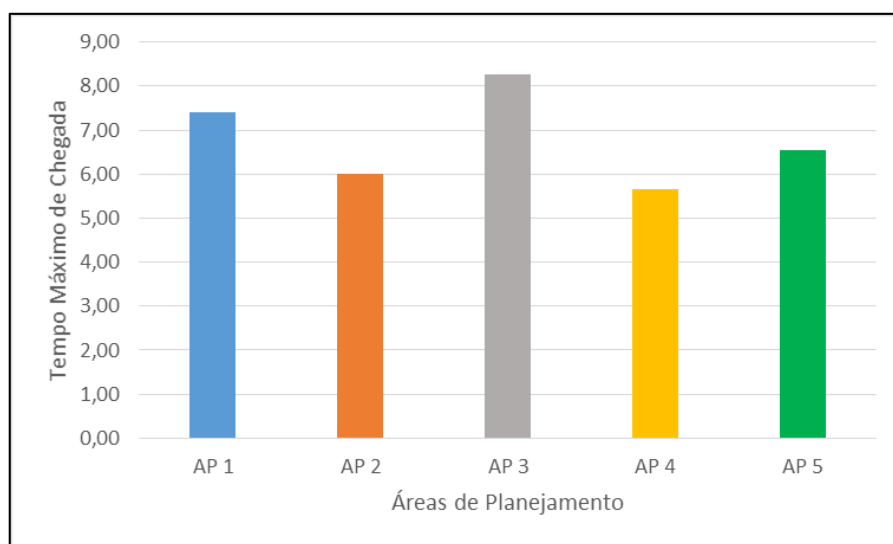


Figura 6.18 – Tempo máximo de resposta das bases no Cenário 4 por AP

Além do tempo de resposta do sistema, é preciso analisar também o percentual de utilização das bases que trata da capacidade de atendimento das mesmas. Tais informações estão disponíveis resumidamente na Tabela 6.2 e de maneira mais completa na Tabela A.2 do Apêndice A. Diante do percentual médio de utilização das bases,

percebe-se que a redução observada nos tempos de resposta afeta diretamente este critério, produzindo um acréscimo no mesmo. Para o Cenário 4 o percentual médio de utilização das bases sofreu aumento, passando a ser 80,6%. Tal aumento só pode ser atribuído à alocação dos veículos de resgate sob a nova configuração dos locais de bases de despacho. Como algumas bases deixaram de ser utilizadas enquanto outras foram abertas, houve uma redistribuição desses veículos de forma a ampliar o atendimento.

Tal redistribuição pode ser avaliada com o auxílio da Figura 6.19, que trata da quantidade de veículos de resgate alocados às bases em cada área de planejamento.

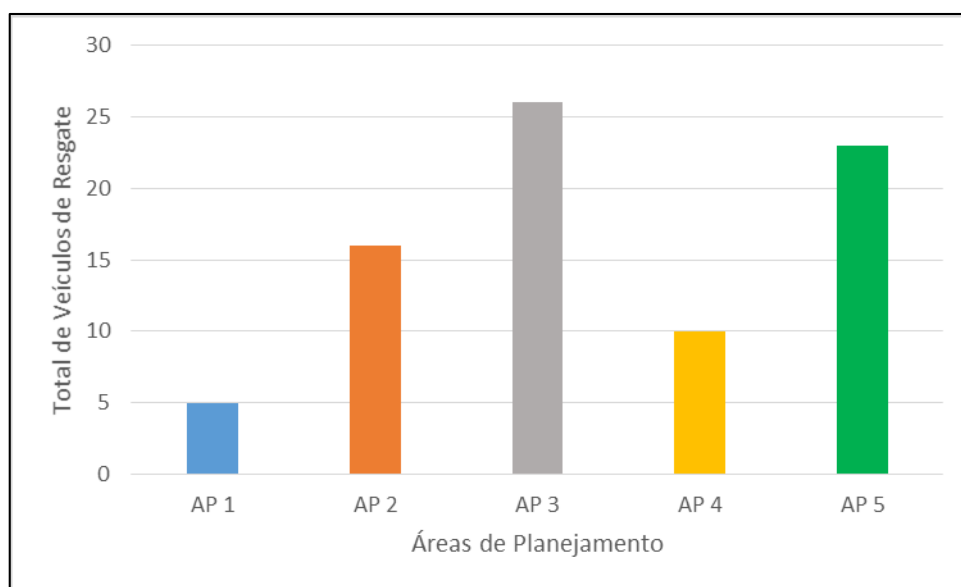


Figura 6.19 – Quantidade de veículos de resgate por AP no Cenário 4

Diante desta figura é possível perceber que houve alteração no padrão de distribuição de veículos de resgate sobre o território das áreas de planejamento, quando comparado com o cenário-base. Houve uma redução significativa no número de veículos alocados às bases de despacho na AP 2, enquanto AP 3 e AP 5 tiveram suas quantidades de ambulâncias incrementadas. No entanto, isso não significa que essas foram as únicas alterações existentes na disposição dos veículos de emergência. Nota-se, também, que há uma grande realocação dos veículos dentro das bases nas próprias áreas de planejamento.

6.1.5 Resultados do Cenário 5

Quanto ao Cenário 5, no mesmo sentido dos cenários anteriores, busca-se avaliar os benefícios gerados por uma alteração na configuração das bases de despacho. Neste caso, a proposta de modificação dos padrões é referente à inclusão de até cinco novas

bases de despacho, com os mesmos 80 veículos disponíveis. Tal proposição resultou em um aumento da ordem de 6,4% na população atendida, superior a 405 mil habitantes, em relação ao cenário-base.

De maneira similar ao observado nos cenários anteriores, a inclusão de novas bases no sistema refletiu no fechamento de três bases pré-existentes nas AP 1, AP 2 e AP 4. Como pode-se perceber na Figura 6.20, essas novas unidades foram distribuídas da seguinte forma: uma na região da AP 4, próximo à Jacarepaguá; duas nas proximidades de Bangu; e outras duas mais a oeste do município, no bairro de Santa Cruz. Vale ressaltar que as quatro últimas bases citadas fazem parte da AP 5. Com isso, foram efetivamente utilizadas 38 bases de despacho e 80 veículos.

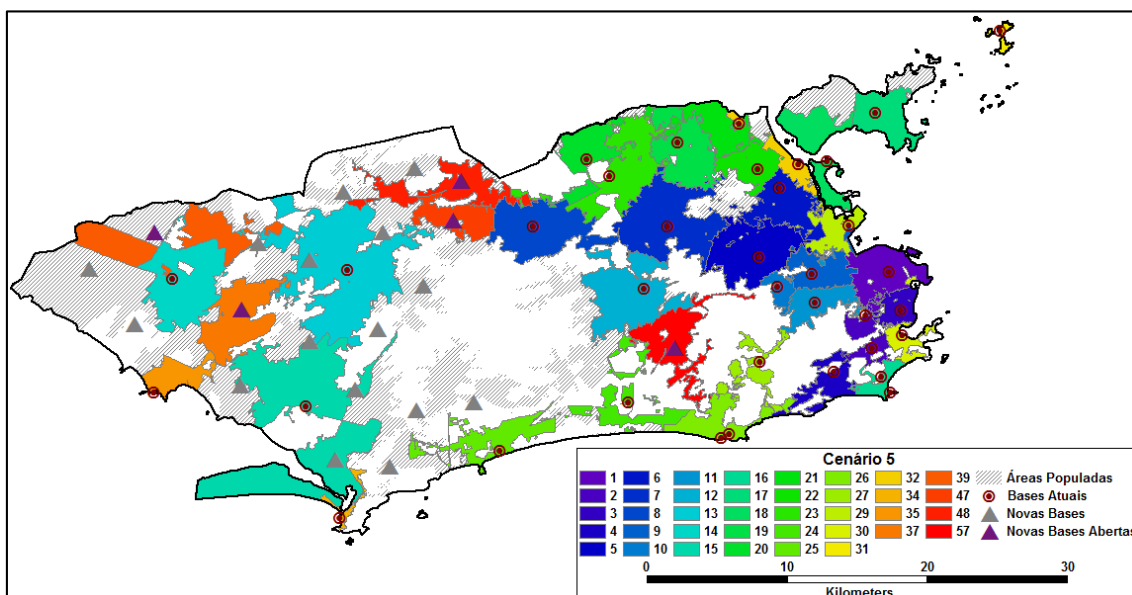


Figura 6.20 – Áreas de cobertura das 38 bases utilizadas no Cenário 5

Mesmo com a inserção de cinco bases de despacho nas AP 4 e AP 5, é possível observar que esta é a região que permanece com o maior percentual de setores censitários sem atendimento no tempo de resposta de 10 minutos, seguida por uma zona da Ilha do Governador e outra entre Irajá e no Complexo do Alemão, ambas na AP 3. Apesar da grande extensão territorial apontada como fora da área de cobertura neste cenário, ela indica apenas uma representação de setores censitários, sem diferenciação entre áreas mais ou menos povoadas. Ou seja, se um setor censitário sem atendimento possuir uma grande extensão territorial e uma pequena quantidade de habitantes, ele terá o mesmo

peso para o mapa de atendimentos do Cenário 5 que um setor censitário pequeno com uma grande população.

Pelo mapa da Figura 6.20 é possível notar, ainda, que os maiores ganhos em cobertura dos setores censitários deste cenário foram obtidos pelas bases localizadas em Santa Cruz, na AP 5. Outra base que representa um grande avanço no nível de cobertura é a localizada na AP 4, próxima a Jacarepaguá, tendo em vista a grande densidade demográfica daquela região.

De acordo com a Tabela 6.2, o tempo médio de resposta às chamadas no Cenário 5 foi de 5,31 minutos, maior apenas que o registrado no Cenário 4 (5,28 minutos). Além disso, o tempo mínimo de espera por atendimento foi de apenas 2,65 minutos, enquanto o maior tempo de resposta foi de 8,26 minutos. Pelos valores apresentados de tempos médios, aparentemente para este cenário, o tempo não se mostra como um grande fator limitante para o aumento de cobertura.

Para comparar a situação nas diferentes áreas de planejamento, a Figura 6.21 apresenta os tempos médios de resposta das bases de despacho de veículos de resgate de maneira desagregada para o Rio de Janeiro.

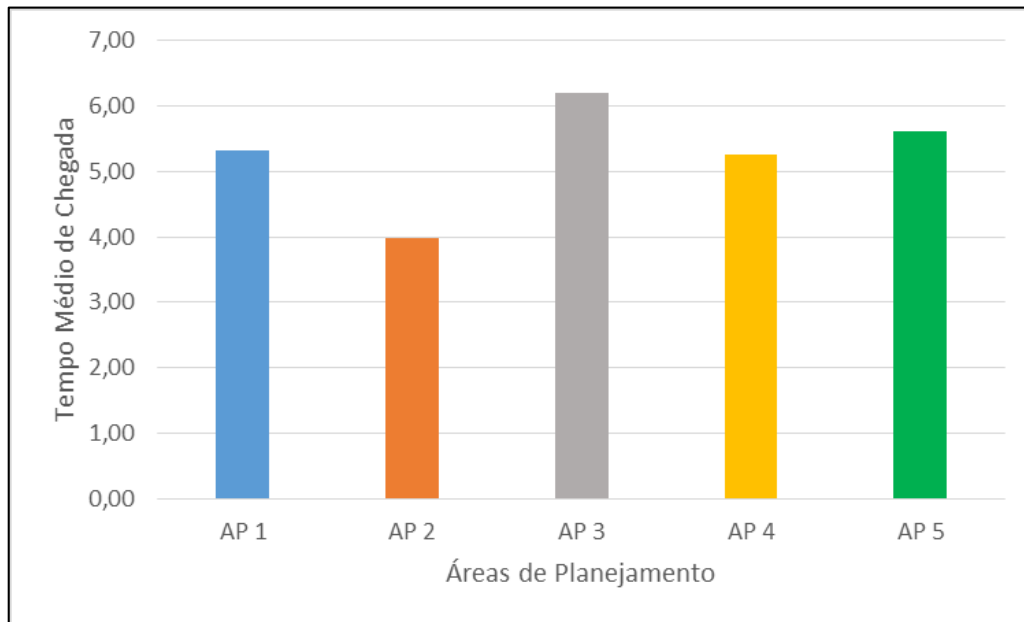


Figura 6.21 – Tempo médio de resposta das bases no Cenário 5 por AP

O resultado do gráfico da figura aponta a grande similaridade entre o padrão de tempos médios de chegada para atendimento nas AP entre os cenários até então analisados, exceto o Cenário 1. As AP 2, AP 3 e AP 5 mantiveram-se estáveis em seus

tempos médios de resposta, enquanto as AP 1 e AP 4 seguiram com redução significativa em relação ao cenário-base.

Já o gráfico da Figura 6.22, por sua vez, complementa às informações anteriores por meio da apresentação dos tempos máximos de resposta desagregados por AP. Mais uma vez o comportamento do tempo manteve-se próximo do observado em cenários anteriores. Destacando a importância da abertura de uma nova base na AP 4, devido à sua grande densidade demográfica, esta região foi a que apresentou o menor tempo máximo de resposta para o sistema EMS.

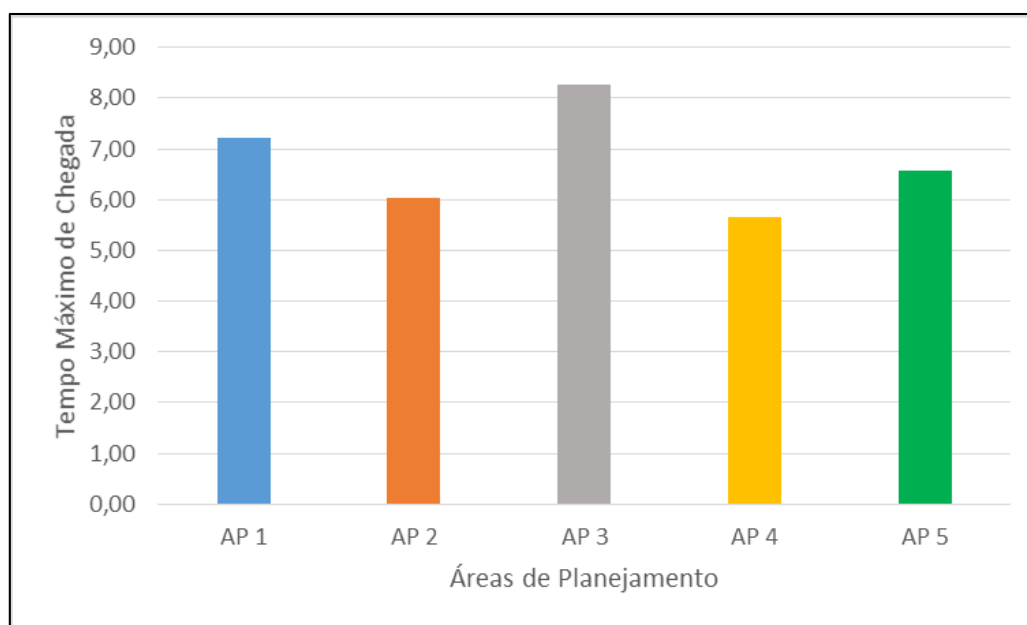


Figura 6.22 – Tempo máximo de resposta das bases no Cenário 5 por AP

Além disso, analisou-se também o tempo mínimo de resposta para o Cenário 5. O gráfico da Figura 6.23 indica que, de maneira semelhante ao apontado no Cenário 3, na região oeste do município, mais precisamente na AP 4, há uma grande disparidade em relação à diferença dos tempos mínimo e máximo de espera por atendimento. Enquanto as demais áreas de planejamento apresentam diferenças próximas dos 3 minutos, a AP 4 registra um valor próximo de 0,9 minutos. Acredita-se que tal fato possa estar relacionado com a concentração dos pontos de demanda, uma vez que esta é uma das regiões mais afetadas pelas grandes formações rochosas espalhadas por todo o Rio de Janeiro.

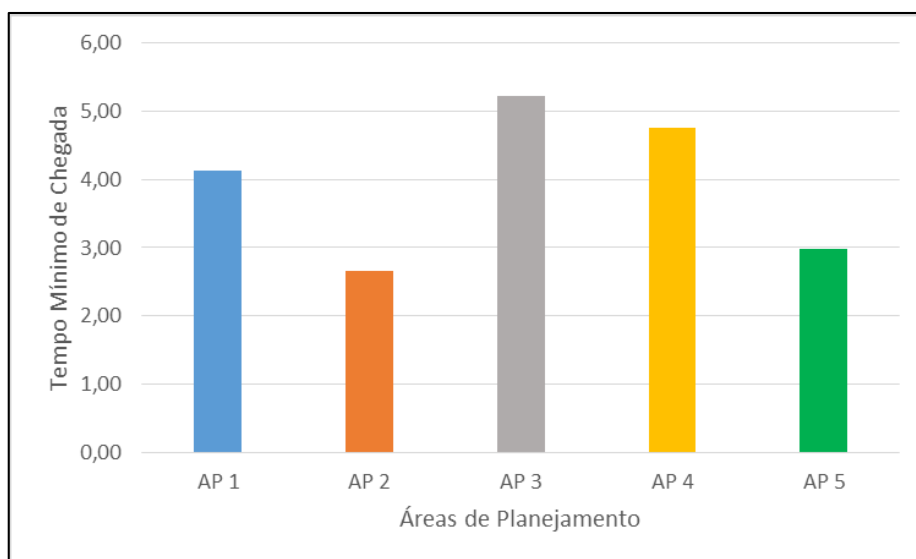


Figura 6.23 – Tempo mínimo de resposta das bases no Cenário 5 por AP

De acordo com a Tabela 6.2, apesar dessas reduções observadas nos tempos de resposta, nota-se um acréscimo considerável no percentual de utilização das bases, que passou a ser de 81,3%. Tendo em vista o elevado percentual médio de utilização das bases registrado, possivelmente, a capacidade de atendimento dessas bases seja um fator mais importante do que o tempo, quando se trata da cobertura de atendimento. Tal fator se torna ainda mais relevante frente à concentração de demanda em determinadas áreas da cidade, como nas AP 2, AP 3 e AP 4.

Outra questão de destaque, tratada pelo gráfico da Figura 6.24, inclui a quantidade de veículos de resgate alocados às bases de cada área de planejamento.

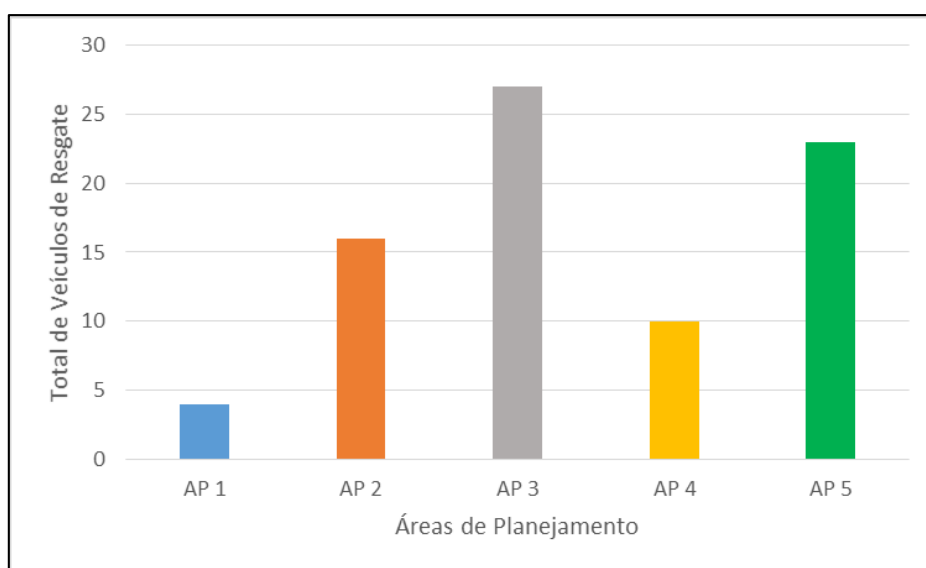


Figura 6.24 – Quantidade de veículos de resgate por AP no Cenário 5

No que tange a quantidade de veículos de resgate disponibilizados para cada AP, como é possível verificar na Figura 6.24, o padrão de distribuição de veículos sobre o território das áreas de planejamento manteve-se próximo dos anteriores. Foram alocados mais veículos para a AP 5, enquanto a AP 4 manteve-se com a mesma quantidade do cenário-base e as demais tiveram suas quantidades de ambulâncias reduzidas. Ainda assim a maior parcela dos veículos permanece alocada às bases de despacho no território da AP 3, devido à elevada demanda da região.

6.1.6 Resultados do Cenário 6

A situação proposta pelo Cenário 6 propicia uma comparação entre o cenário-base e uma das variações de maior impacto para o serviço, a possibilidade de abertura de até 10 novas bases despacho com os mesmos 80 veículos de resgate. O principal objetivo deste cenário é avaliar se são necessárias medidas de grande impacto, para alcançar resultados mais significativos quanto à cobertura e tempo de resposta dos serviços.

Pela Tabela 6.1 pode-se notar que a cobertura total do sistema cumpriu com sua expectativa de crescimento, chegando ao patamar dos 5.714.487 habitantes, cerca de 90,4% da população do município. O aumento em relação ao cenário-base de 7,7% representa um ganho de mais de 490 mil pessoas. Apesar da cobertura expressiva, superior a 90% da população, o ganho percentual comparado aos demais cenários mostrou-se pouco representativo, tendo em vista que foram acrescentadas 5 bases de despacho além das possibilitadas pelo Cenário 5, que obteve cobertura de 89,1% da população.

Assim como nos cenários anteriores, a abertura dessas 10 novas bases implicou na descontinuidade da utilização das mesmas 3 bases apontadas anteriormente (Santa Teresa, Copacabana e Barra da Tijuca), fazendo com que 43 bases fossem efetivamente utilizadas para o atendimento da demanda no Cenário 6. Diante disso, a Figura 6.25 apresenta o mapa do município do Rio de Janeiro com a delimitação das áreas atendidas em até 10 minutos das 43 bases utilizadas neste cenário, com disponibilidade de 80 veículos de resgate.

Ao considerar que as bases pré-existentes que deixaram de ser utilizadas mantêm-se as mesmas desde o Cenário 2, é possível constatar um problema de sobreposição de determinados áreas de cobertura em detrimento do não atendimento no tempo estabelecido em outras localidades.

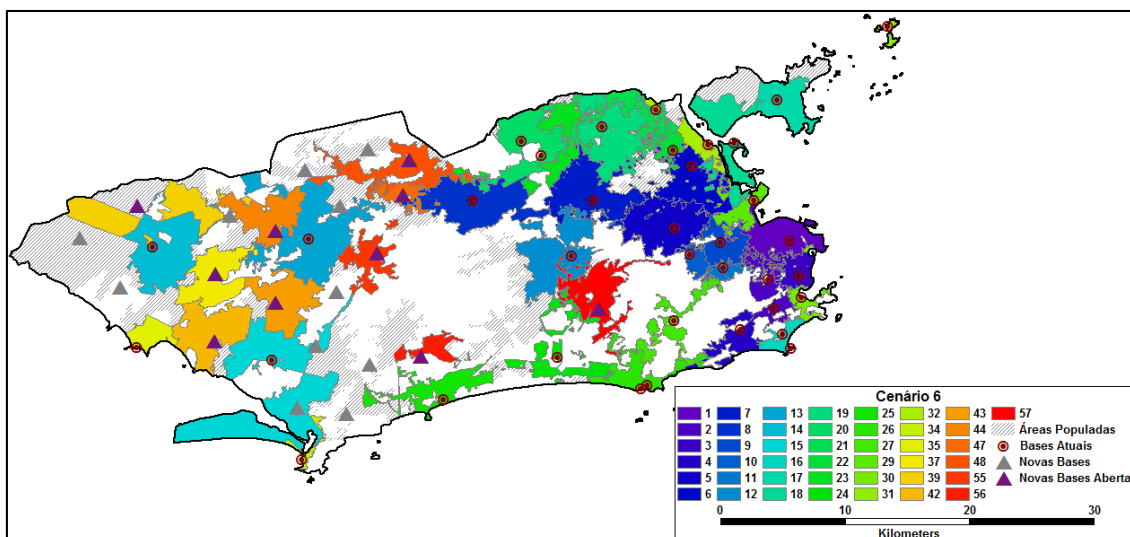


Figura 6.25 – Áreas de cobertura das 43 bases utilizadas no Cenário 6

Ainda é possível notar na Figura 6.25 que, apesar da inclusão de duas novas bases na AP 4 e outras oito na AP 5, a região oeste continua marcada pela presença de setores censitários sem cobertura do CBMERJ no tempo de 10 minutos. No entanto, é importante ressaltar que houve um aumento considerável na cobertura geral do sistema, sem elevar a quantidade de veículos utilizados. Além disso, a considerável extensão territorial apontada como fora da área de cobertura neste cenário, indica apenas uma representação de setores censitários descobertos, sem diferenciação entre áreas mais ou menos povoadas. Com isso, é possível afirmar que as áreas em cinza no mapa possuem uma pequena parcela da população.

Já na Tabela 6.2, pode-se observar que o tempo médio de resposta às chamadas foi de 5,47 minutos no Cenário 6, o mais alto registrado entre todos os cenários, inclusive maior que o do cenário-base. Além disso, os tempos mínimo e máximo de espera por atendimento também foram elevados, 2,74 e 8,55 minutos, respectivamente. No entanto, tal fato ainda não deve representar fator restritivo para o aumento da cobertura. Na Figura 6.26 podem ser observados, separadamente para cada AP, os tempos médios de chegada dos veículos de resgate ao local de atendimento.

Pela primeira vez um cenário apresentou tempo médio de resposta por área de planejamento fora do padrão dos demais. As AP 1 e AP 4 apresentaram queda em seus tempos, em relação ao cenário-base, no entanto, eles mantiveram-se superiores a 5 minutos. Já a AP 2, apesar de continuar apresentando o menor tempo médio de resposta, ultrapassou o limite dos 4 minutos, diferente dos cenários anteriores. Outra área de planejamento que teve sua média de tempos superior foi a AP 3, possivelmente em

decorrência da realocação dos veículos de resgate. Por fim, a AP 5 manteve-se no mesmo patamar do cenário-base, com tempo médio próximo dos 5,5 minutos.

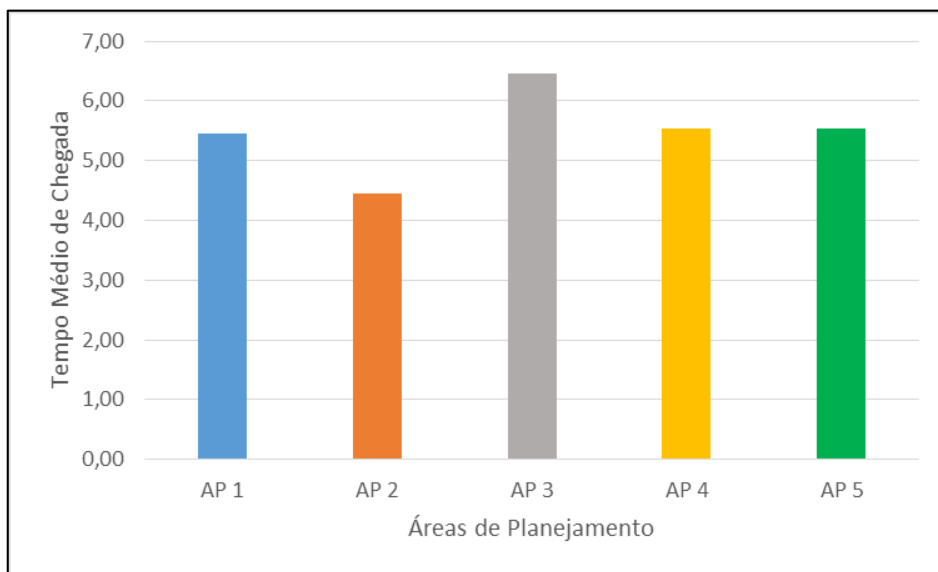


Figura 6.26 – Tempo médio de resposta das bases no Cenário 6 por AP

O gráfico da Figura 6.27, por sua vez, em complemento às informações supracitadas, apresenta os tempos máximos de resposta desagregados por AP.

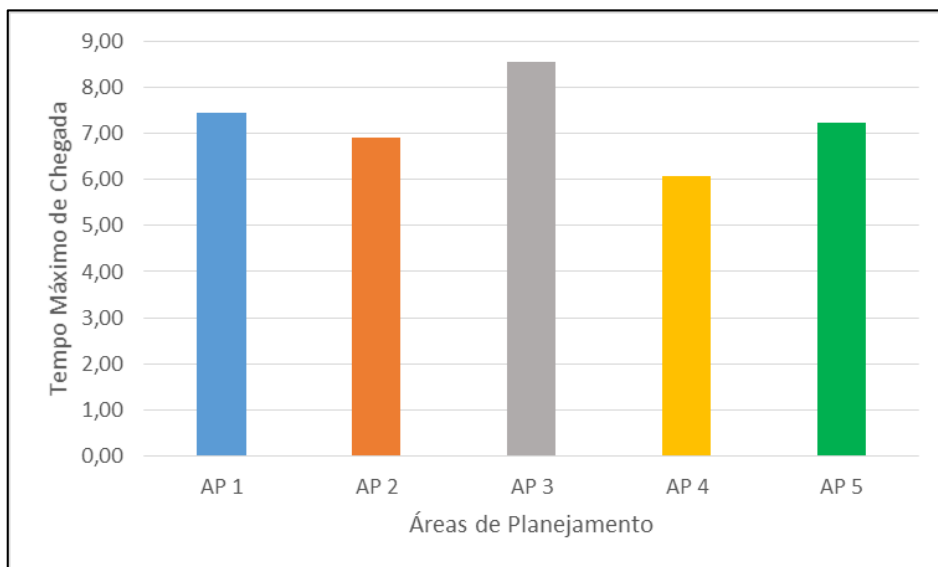


Figura 6.27 – Tempo máximo de resposta das bases no Cenário 6 por AP

Pode-se observar que, quando comparado com o cenário-base, o Cenário 6 apresentou maiores tempos máximos de espera por atendimento nas AP 2, AP 3 e AP 5.

Isso significa que a cobertura nestas áreas de planejamento pode ter sofrido um incremento considerável, de forma que o tempo não é o fator impeditivo para que isso ocorresse. Já nas AP 1 e AP 4, o tempo de máximo de resposta diminuiu, o que pode ser explicado pela concentração da demanda em determinados locais, além da realocação de veículos de resgate.

Além do tempo de resposta do sistema, é preciso verificar também os percentuais de utilização das bases, disponibilizados resumidamente na Tabela 6.2 e de maneira mais completa na Tabela A.2 do Apêndice A. Diante do percentual médio de utilização das bases, percebe-se que a redução observada nos tempos de resposta afeta diretamente este critério, produzindo um acréscimo no mesmo, uma vez que para o Cenário 6, o percentual médio aumentou, passando a ser 82,2%. Como 3 bases deixaram de ser utilizadas e outras 10 foram abertas, tornou-se necessária a redistribuição dos veículos de resgate, de forma a garantir a ampliação do atendimento à população. Diante desta realocação e do aumento efetivo de 7 bases sob o território, esperava-se o aumento do percentual de utilização das bases, tendo em vista que o número de veículos não foi alterado.

Tal redistribuição pode ser melhor avaliada com o auxílio da Figura 6.28, que trata da quantidade de veículos de resgate alocados às bases em cada área de planejamento.

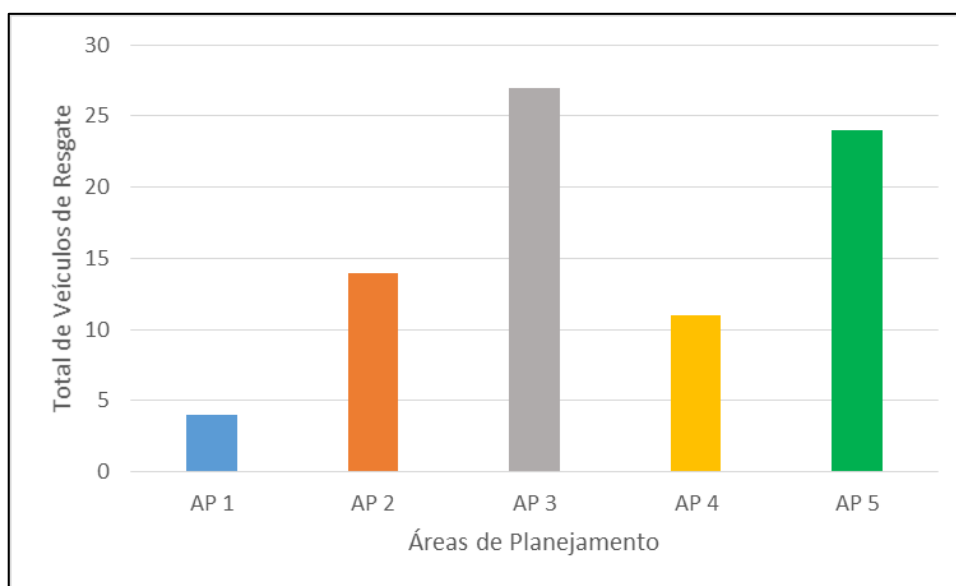


Figura 6.28 – Quantidade de veículos de resgate por AP no Cenário 6

Diante desta figura é possível perceber que houve alteração no padrão de distribuição de veículos de resgate sobre o território das áreas de planejamento, quando comparado com o cenário-base. Houve significativa redução no número de veículos

alocados às bases de despacho nas AP 1 e AP 2, enquanto as AP 4 e AP 5 tiveram sua quantidade de ambulâncias incrementada.

A área de planejamento que apresentou o crescimento mais expressivo na quantidade de veículos foi a AP 5, que passou de 18 para 24 ambulâncias. Nota-se, ainda, que houve uma grande realocação dos veículos dentro das próprias áreas de planejamento, especialmente na AP 5, em decorrência da grande quantidade de bases abertas nesta área de planejamento.

6.1.7 Resultados dos Cenários 7 a 11

Os Cenários 7 a 11 apresentam parâmetros semelhantes aos utilizados nos Cenários 2 a 6, sendo a única diferença a utilização de 85 veículos, que poderiam ser alocados a qualquer uma das bases, desde que respeitada a condição de capacidade da base em receber novas ambulâncias. Como se sabe, tal capacidade varia de 1 a 5 veículos, e é considerada independente da cobertura dos locais de demanda.

Como é possível observar na Tabela 6.1, os percentuais de cobertura do sistema se mantiveram os mesmos dos cenários correspondentes que utilizavam 80 veículos de resgate. Apesar da inserção de mais cinco veículos no serviço de atendimento de urgência/emergência, nota-se que eles não afetam a cobertura geral do sistema, o que, aparentemente, pode não representar ganhos efetivos para o EMS. Os mapas de cobertura de cada cenário podem ser visualizados no Apêndice B.

Apesar da manutenção dos percentuais de cobertura, no entanto, não se pode afirmar que realmente não houveram ganhos diante da simulação destes cenários. Antes disso, devem ser verificados os demais pontos de análise, como os tempos de resposta e o percentual de utilização das bases por cenário.

Na Tabela 6.2 pode-se observar os tempos de resposta e o percentual de utilização das bases, fatores fundamentais na análise destes cenários. Nota-se que os tempos médios de resposta entre os Cenários 7 e 10 mantiveram-se muito próximos dos encontrados entre os Cenários 2 e 5. No entanto, no Cenário 11, caracterizado pela abertura de 10 novas bases com 85 veículos utilizados, percebe-se uma redução significativa em relação ao Cenário 6, de 5,47 minutos de espera para 5,25 minutos. Tal situação pode indicar que, para a maioria dos cenários, a inserção de 10 veículos a mais no sistema pode não ter muito efeito sob o raio de cobertura em função da falta de capacidade de determinadas bases, que apresentam grandes demandas, em receber um número maior de veículos. Já no Cenário 11, onde abre-se um maior número de bases, tornou-se possível alocar melhor

tais veículos, de maneira a influenciar no raio de cobertura das bases neste cenário, apesar de não aumentar o percentual de pessoas atendidas.

O mesmo padrão de comportamento do tempo médio de resposta foi registrado para os tempos mínimos e máximos, que variaram de 2,61 minutos (tempo mínimo) no Cenário 7 a 8,30 minutos (tempo máximo) no Cenário 11. Apesar da quase imperceptível variação no tempo de resposta do sistema, espera-se que um maior impacto seja registrado no percentual de utilização das bases, uma vez que o número maior de veículos é capaz de influenciar diretamente neste fator.

Tal expectativa se confirmou ao verificar que a média de utilização das bases, por cenário, reduziu cerca de 5,7% entre o grupo de Cenários 2 a 6 e o grupo de Cenários 7 a 11 (de 80,4% de utilização no primeiro grupo para 74,7% no segundo). Diante disso acredita-se que, apesar da manutenção da cobertura, houve uma redução na carga de trabalho das equipes de resgate, o que permite um maior período de descanso entre um atendimento e outro.

Com o objetivo de comparar o comportamento do tempo médio de chegada das equipes ao local de atendimento nas diferentes áreas de planejamento, o gráfico da Figura 6.29 apresenta de maneira desagregada os tempos médios de resposta das bases de despacho do Rio de Janeiro para estes cinco cenários.

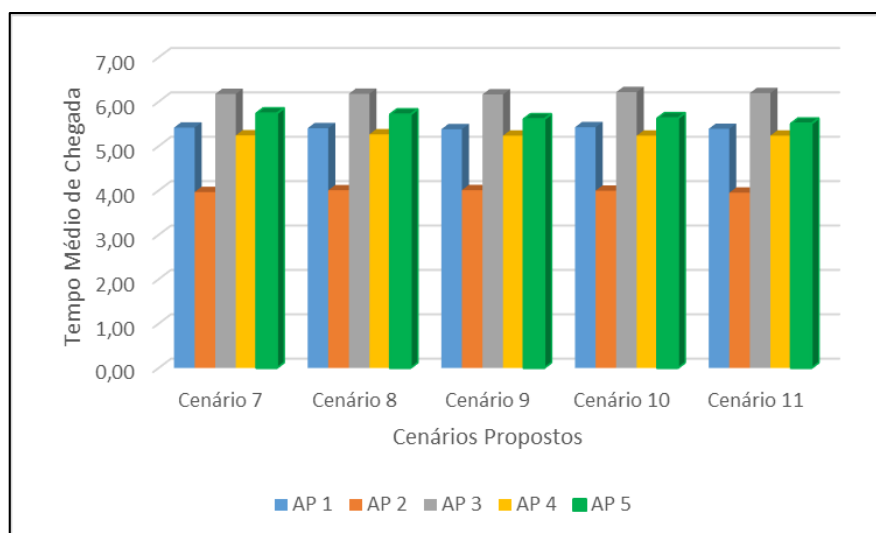


Figura 6.29 – Tempo médio de resposta das bases nos Cenários 7 a 11, por AP

Assim como nos cenários analisados anteriormente, percebe-se que os menores valores de tempo médio de resposta são registrados na AP 2 (Zona Sul), com tempos próximos dos 4 minutos. Observa-se, ainda, que as AP apresentam medidas muito

semelhantes de tempo médio de resposta para os cenários, com exceção da AP 5 que apresenta as maiores variações entre os cenários, de 5,51 minutos no Cenário 11 a 5,74 minutos no Cenário 7.

Quanto ao percentual de utilização das bases, a Figura 6.30 apresenta de maneira desagregada os percentuais médios de utilização das bases de despacho para estes cinco cenários, com o intuito de confrontar o comportamento destas variáveis nas diferentes áreas de planejamento do município do Rio de Janeiro.

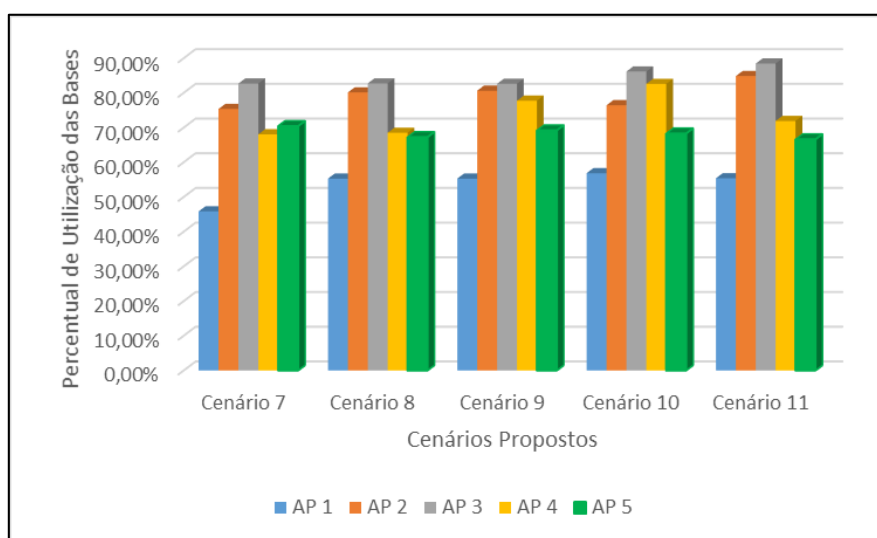


Figura 6.30 – Percentual médio de utilização das bases nos Cenários 7 a 11, por AP

Pela Figura 6.30, é possível perceber que a AP 1 é a que exibe os menores percentuais de utilização em suas bases, em todos os cenários inferior a 60%. Tal situação pode ser justificada pela menor extensão territorial desta área, que incide diretamente na demanda total observada, principalmente quando se compara tal área à AP 5, a maior do município. Vale ressaltar, ainda, que esta AP é uma das áreas de planejamento que teve uma base de despacho fechada diante da abertura de novas bases testadas pelos cenários, o que reflete a possibilidade de sobreposição dos raios de cobertura das bases e promove a divisão da demanda entre as bases de despacho capazes de atender tais demandas.

Quanto à AP 2, nota-se uma tendência de crescimento no percentual da utilização das bases ao longo dos cenários. Tal comportamento pode refletir as consequências da realocação do número de veículos de resgate à medida que mais bases são abertas com a evolução dos cenários propostos. Comportamento similar é apresentado pela AP 4 até o Cenário 10, que perdeu uma base pré-existente e recebeu uma nova base em local diferente. Já no Cenário 11 houve uma queda considerável neste percentual para esta AP,

possivelmente provocada pela inclusão de uma segunda nova base de despacho aberta na região.

Já as AP 3 e AP 5 apresentam resultados totalmente contraditórios entre si. Enquanto a AP 3 mantém número de bases de despacho para atender à sua demanda, a AP 5 sofre o incremento de 8 bases de despacho ao longo dos cinco cenários testados, que demandam um maior número de veículos do que o observado antes dessa nova disposição de bases. Com isso, a AP 3 manifesta tendência de crescimento do percentual de utilização das bases e a AP 5 registra tendência contrária.

Outra questão relevante e capaz de complementar a análise da utilização das bases de despacho de veículos é tratada pelo gráfico da Figura 6.31, que apresenta a quantidade de veículos de resgate alocados a cada base por cenário.

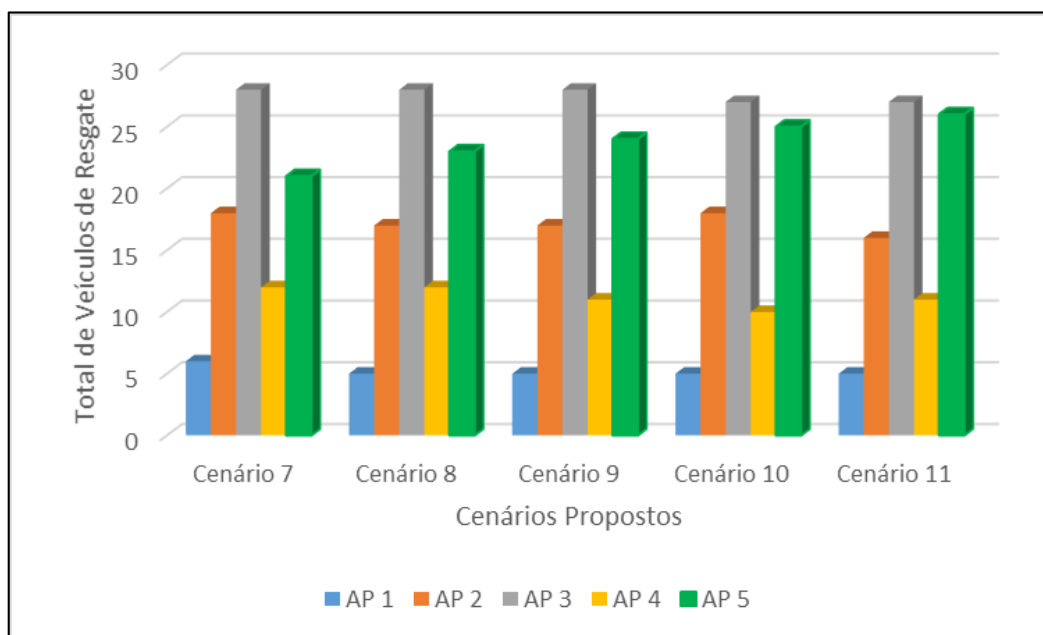


Figura 6.31 – Quantidade de veículos de resgate por AP nos Cenários 7 a 11

Corroborando com a análise sobre o percentual de utilização das bases, especialmente nas AP 3 e AP 5, percebe-se pela Figura 6.31 que houve uma redução no número de veículos alocados às bases da Zona Norte (de 28 para 27), enquanto ocorreu um aumento significativo de 21 para 26 ambulâncias que servem à AP 5. As demais AP apresentaram variações ao longo dos cenários, no entanto, quando se compara o Cenário 7 com o Cenário 11, observa-se que todas elas tiveram seu número de veículos disponíveis reduzido.

Diante da análise destes cenários percebe-se que não basta que sejam adicionados veículos ao sistema quando o objetivo é aumentar o atendimento à população, uma vez que, possivelmente, as bases selecionadas nas proximidades de áreas não atendidas, não possuem condições de receber mais ambulâncias. Isso ocorre quando a capacidade física relativa à área de acomodação dos veículos da base de despacho é atingida, restringindo o aumento da cobertura. No entanto, outros fatores relevantes na operacionalização dos EMS podem ser melhorados diante da inclusão de novos veículos, como a redução no número de saídas para atendimento que as equipes realizam diariamente, melhorando as condições de trabalho destas pessoas.

6.2 Análise Comparativa dos Resultados Obtidos

A análise cenário a cenário permite apresentar questões pontuais dos resultados obtidos, porém uma análise comparativa entre os cenários e mais abrangente também deve ser realizada, de maneira a apontar o que se mostra mais adequado do ponto de vista prático. Além disso, é necessário mensurar também o esforço computacional utilizado na busca pelas soluções apresentadas, com o intuito de direcionar esforços aos métodos de solução mais adequados ao tipo de problema, caso isso se mostre necessário.

Para tanto, como apontado anteriormente nas Tabelas 6.1 e 6.2, estabeleceu-se como critérios de avaliação os seguintes fatores: a cobertura da população; os recursos utilizados; os tempos de resposta, em especial o tempo médio de resposta; e o percentual de utilização das bases de despacho. De forma a considerar a disparidade existente entre as regiões do município, escolheu-se realizar a análise por Área de Planejamento, tornando-se possível, assim, apontar as áreas do município que apresentam maior carência deste tipo de serviço.

Como é possível observar na Figura 6.32, a partir do cenário-base (Cenário 1), houveram ganhos relevantes relacionados à cobertura da população. Não se pode dizer, no entanto, que esse aumento no número de atendimentos apresenta uma relação de crescimento diretamente proporcional ao número de bases de despacho utilizadas, uma vez que o Cenário 1 apresentava um maior número efetivo de bases utilizadas do que o Cenário 2, porém este segundo apresentou uma cobertura superior.

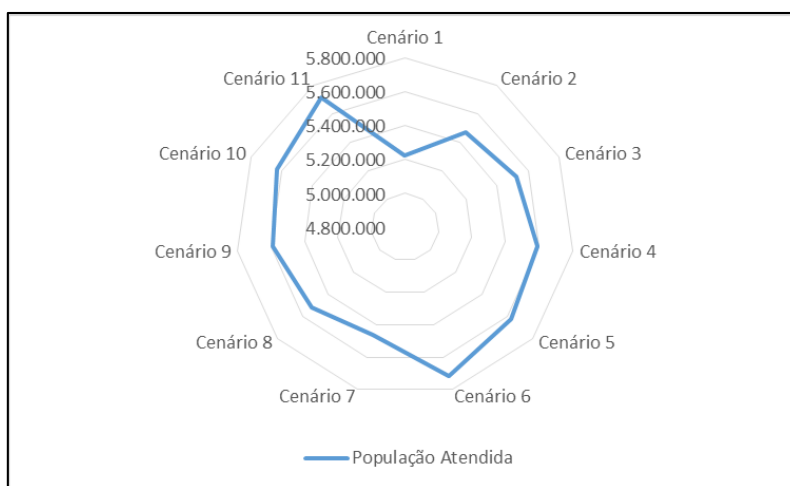


Figura 6.32 – Comparação da população coberta em cada cenário

Pode-se atribuir tal crescimento à melhor localização das bases de despacho de veículos de resgate. A redistribuição destas bases ao longo do território do município foi capaz de identificar as regiões com sobreposição de cobertura, de maneira a deixar de utilizar algumas bases e dar preferência à abertura de outras em regiões que apresentavam um elevado número de habitantes sem atendimento no tempo determinado.

Ainda no que se refere ao comportamento da cobertura da população frente a outros fatores, percebeu-se que a variação proposta no número de veículos de emergência, de 80 para 85 veículos, não influenciou diretamente na cobertura total. Pode-se afirmar isso ao notar que os pares de cenários com características semelhantes, diferenciados apenas pela quantidade de veículos utilizados, apresentaram o mesmo percentual de população atendida.

Quanto aos veículos utilizados, é possível perceber que sua distribuição pelo território se dá em função, principalmente, da distribuição das ocorrências de chamadas de emergência (observar Figura 6.33). A AP que teve o maior número de veículos alocados em todos os cenários foi a AP 3, justamente a que apresentou o maior percentual de registros de ocorrências, próximo dos 35%. Já a AP 1, que teve menos de 10% dos registros de ocorrências, foi a que apresentou o menor número de veículos alocados. Uma exceção, entretanto, pode ser observada nas AP 2 e AP 4, uma vez que a AP 4 apresenta maior número de registros de ocorrências e menor quantidade de veículos alocados. No entanto, é preciso registrar que a AP 2 apresenta maior quantidade de bases de despacho que a AP 4, e que cada base aberta demanda a alocação de, no mínimo, um veículo de emergência.

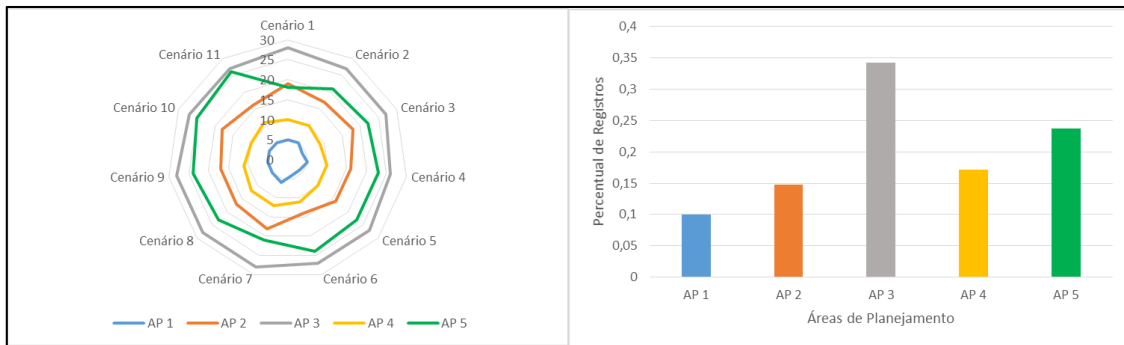


Figura 6.33 – Comparação entre a distribuição dos veículos e o percentual de registros por AP

Percebe-se, ainda, que a quantidade de bases abertas e de veículos utilizados não interfere no comportamento dos tempos de resposta, como é possível observar na Figura 6.34. O tempo médio de resposta, que se manteve próximo dos 5,3 minutos, registraram pequenas alterações entre os cenários, assim como os tempos mínimo e máximo, que não impactaram no seu comportamento geral. O padrão de tempos de resposta médio, mínimo e máximo por área de planejamento pode ser observado no Apêndice C.

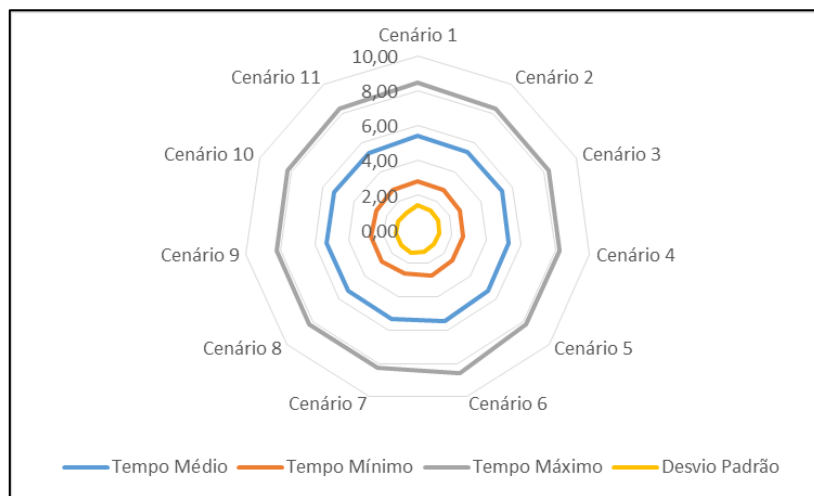


Figura 6.34 – Comparação entre os tempos de resposta, em minutos, por cenários

O fator que mais sofre influência da variação na quantidade de bases abertas e de veículos utilizados é o percentual médio de utilização das bases, como pode-se observar na Figura 6.35. Os menores percentuais de utilização das bases são encontrados na AP 1, na região central do Rio de Janeiro, onde apenas nos Cenários 3, 5 e 6 foram identificadas bases acima dos 60% de utilização. Em contrapartida na AP 3, em todos os cenários verifica-se que tal fator se mantém acima dos 80%, em função da grande demanda por atendimento registrada naquela região. As demais AP apresentam comportamento mais

inconstante, tendo em vista que na maioria dos cenários apresentaram média entre 60% e 80% de utilização das bases, no entanto especialmente entre os Cenários 2 e 6, verifica-se uma requisição maior dessas bases.

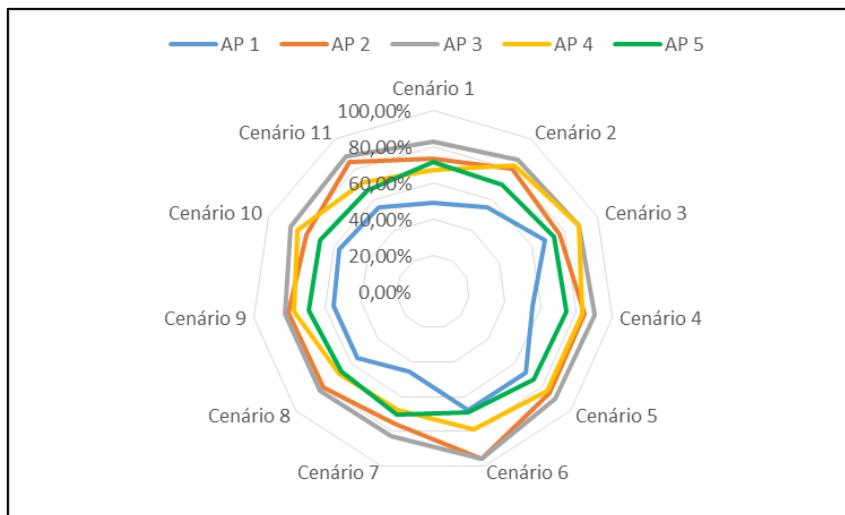


Figura 6.35 – Comparação entre os percentuais médios de utilização das bases nos cenários, por AP

Com relação à complexidade computacional associada ao modelo matemático proposto, foram propostos três quesitos para análise dos resultados obtidos: o tempo de processamento; o *gap* encontrado pelo CPLEX; e o número de iterações realizadas. A Figura 6.36 trata do primeiro quesito, o tempo de processamento. Como é possível observar, o tempo para encontrar a solução ótima foi praticamente constante e pequeno, na maioria dos casos inferior a um minuto. Tal fato se dá em razão de grande número das variáveis de decisão não demandar grandes escolhas, tendo em vista que é necessária a utilização de uma determinada quantidade mínima de bases pré-definidas.

O Cenário 6 foi o que apresentou o maior tempo de processamento. No entanto, já imaginava-se ser este o cenário de maior complexidade, tendo em vista que ele permite localizar até 10 novas bases e reorganizar os 80 veículos de resgate disponíveis. Apesar dos tempos computacionais estarem abaixo dos 6 minutos, o comportamento deste cenário dá indícios de que, caso fosse possível a utilização de um número maior que 10 novas bases, a complexidade computacional poderia estar relacionada, principalmente, à quantidade de veículos disponíveis, tendo em vista que o mesmo número de veículos deveria ser redistribuído de forma a atender a um maior número de bases abertas.

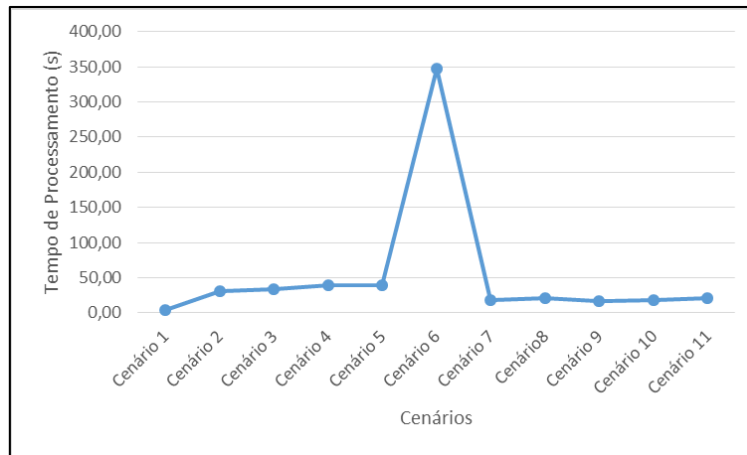


Figura 6.36 – Tempo de processamento dos resultados por cenário

Quanto à análise do comportamento do *gap*, percebeu-se que para os cenários propostos, o mesmo manteve-se igual a zero, ou seja, foi possível encontrar o resultado ótimo em todos os cenários. No entanto, acredita-se que o tempo de resposta estipulado pelo serviço possa comprometer tal desempenho caso sofra incremento como, por exemplo, de 10 para 15 minutos. Tal situação pode ser limitante tendo em vista que o aumento do raio de cobertura das bases, ocasionado pelo aumento do tempo estabelecido para resposta do sistema, favorece o crescimento das sobreposições de áreas cobertas e aumenta o número de alocações possíveis entre pontos de demanda e bases de despacho de ambulâncias.

Já no que se refere ao número de iterações realizadas, percebe-se comportamento similar ao do tempo de processamento. Como é possível perceber na Figura 6.37, o segundo grupo de cenários (Cenários 2 a 6) registraram as maiores quantidades de iterações realizadas, chegando ao seu ápice próximo das 90.000 no Cenário 6. Já o terceiro grupo de cenários (Cenários 7 a 11) registrou menos de 20.000 iterações em todos os testes realizados.

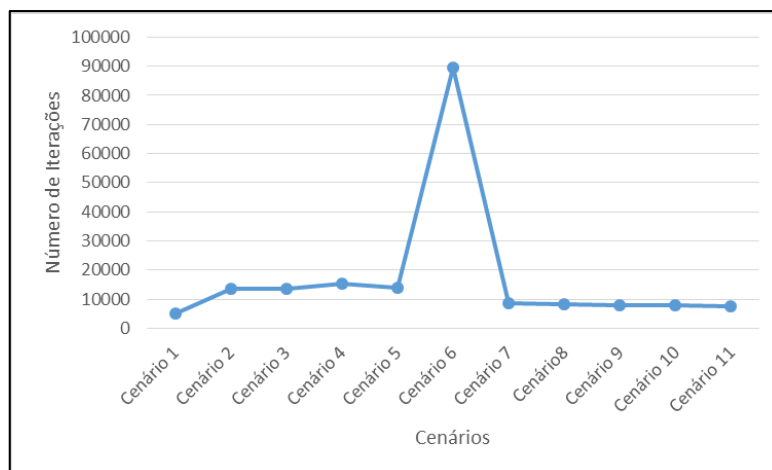


Figura 6.37 – Número de iterações realizadas para chegar aos resultados por cenário

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Por meio da discussão teórica apresentada foi possível melhor compreender o funcionamento dos serviços médicos de emergência no Brasil e no mundo, e ao mesmo tempo, identificar a necessidade de desenvolvimento de novas ferramentas para auxiliar no processo de planejamento desses serviços de grande utilidade pública.

Como situações que geram chamadas de emergência fazem parte do cotidiano das pessoas, torna-se importante realizar o planejamento adequado para realização das operações de atendimento pré-hospitalar, além de garantir a alocação efetiva de recursos empregadas a serviços de emergência que proporcionem alívio eficiente e oportuno às pessoas mais necessitadas.

Uma dessas necessidades identificadas, está relacionada ao processo de localização de bases de despacho de veículos de resgate para atendimento de áreas de demanda deste serviço. Tradicionalmente, a decisão de localizar tais facilidades envolve dois aspectos em especial: a definição dos locais que devem ser selecionados como bases e pontos de liberação de veículos de resgate; e a definição da quantidade desses veículos que devem ser posicionados em cada base. Para tanto, devem ser levados em consideração dados de demanda e possíveis locais candidatos a receber tais bases.

Na revisão de literatura observou-se que vários modelos já foram desenvolvidos para resolver este tipo de problema de localização de facilidades. Apesar de existirem diversas categorias de modelos, o mais popular entre eles e mais amplamente difundido é o modelo que contempla coberturas. Para esses modelos, todos os pontos de demanda devem ser cobertos por alguma facilidade e devem ser respeitados os padrões de cobertura estipulados. Normalmente esses padrões envolvem variáveis como distância e tempo, especialmente esta última.

Dessa forma, o presente estudo contribui para o planejamento dos serviços médicos de emergência de forma a permitir, por meio da utilização de um modelo matemático de otimização, a melhor localização das bases de despacho de veículos de resgate, assim como a quantidade de veículos que deve ser alocada a cada uma dessas bases. Os principais objetivos estabelecidos para tanto tratam da maximização da população coberta pelo serviço e da minimização do tempo de resposta do sistema e da distância a ser percorrida entre a base e o ponto de demanda.

Portanto, o objetivo principal desse estudo foi atingido, visto que foi apresentada uma nova modelagem matemática para localização-alocação de bases de despacho de

ambulâncias que considera a maximização da população coberta, priorizando áreas com elevados registros históricos de ocorrências (gerais e de trânsito), e a minimização da quantidade de bases e da distância destas às suas respectivas áreas de atendimento, para auxiliar no planejamento governamental relacionado aos atendimentos de emergência. A partir dessa modelagem tornou-se possível indicar, dado um conjunto de locais possíveis, quais bases de despacho devem ser abertas e/ou utilizadas, quantos veículos de resgate devem ser alocados a elas e, ainda, a quais bases de despacho os pontos de demanda devem ser alocados.

Por meio dos 11 cenários criados para aplicação e experimentos computacionais do modelo, divididos em três grupos principais (Cenário 1; Cenários 2 a 6; e Cenários 7 a 11) tornou-se possível: (Cenário 1) avaliar o modelo matemático por meio da aplicação de um cenário real que representa a cobertura oferecida pelo CBMERJ no ano de 2014; (Cenários 2 a 6) realizar análises referentes à diferentes configurações de bases de despacho que utilizam a mesma quantidade de veículos de resgate disponíveis atualmente, 80 veículos; e (Cenários 7 a 11) realizar análises referentes à diferentes configurações de bases de despacho diante da inclusão de mais cinco ambulâncias de resgate no sistema, totalizando 85 veículos utilizados.

Para análise dos resultados foram estabelecidos indicadores de desempenho que avaliam a quantidade de bases de despacho utilizadas por cenário, a quantidade de veículos alocadas a cada base e nas AP, além dos tempos de resposta obtidos e dos percentuais de utilização das bases por cenário e por AP. Também foram mensurados indicadores relacionados ao desempenho computacional, como tempo de execução, o *gap* e a quantidade de iterações realizadas.

Os resultados dos cenários propostos apontaram que, apesar da cobertura atual do CBMERJ ser de 82,7% da população, as localizações de algumas bases de despacho mostraram-se insatisfatórias, uma vez que, a efetiva redução no número de bases utilizadas (Cenários 2 e 7) resultou em um aumento de 3,8% da cobertura. Tal fato representa a sobreposição existente na atual configuração da distribuição de bases de despacho de veículos de resgate no município do Rio de Janeiro.

Além disso verificou-se que a quantidade de veículos utilizada não impacta diretamente na cobertura. Tal afirmação pode ser feita tendo em vista que não houve diferenciação na cobertura entre os cenários correspondentes entre os grupos 2 e 3, correspondentes aos Cenários 2 a 6 e Cenários 7 a 11, respectivamente. Apesar disso, tal variável é capaz de influenciar positivamente o percentual de utilização das bases de

despacho, tendo em vista que os resultados do Grupo 3 de variáveis mostrou-se 5,7% menor que o do Grupo 2.

Como sugestões para trabalhos futuros, acredita-se que a modelagem matemática proposta neste estudo pode ser ampliada, ou mesmo, incorporada ao processo de planejamento da localização de base de despacho de veículos de resgate do CBMERJ, tendo em vista que adotou-se como parâmetro de entrada os locais onde são, efetivamente, realizadas as liberações de veículos de resgate para atendimento da população.

Considerando, ainda, que a demanda dos sistemas EMS sofre variações ao longo do tempo (horários do dia, dias da semana e meses do ano), como demonstrado no estudo de caso deste trabalho, tem-se como possibilidade para trabalhos futuros o estudo de localização para implantação de bases móveis de despacho de ambulâncias. Como este tipo de instalação representa um menor custo fixo, elas podem se deslocar até os locais com maior incidência de chamadas em determinados períodos do dia e seguir para outros pontos posteriormente.

Outra possível abordagem está relacionada à estudos específicos para detalhamento da composição e estimativas mais precisas para os custos de utilização das bases de despacho. Este tipo de abordagem é capaz de auxiliar na correta determinação dos parâmetros de entrada do modelo, tornando-o mais realista.

Sugere-se, também, para estudos futuros analisar as variações entre os índices assumidos para W_1 e W_2 , que são os pesos atribuídos aos diferentes tipos de ocorrências. Para tanto, aconselha-se que sejam aprofundadas as análises estatísticas para essas ocorrências, de acordo com o CID dos atendimentos. Ainda quanto à modelagem matemática, como se trata de um problema multiobjetivo, sugere-se para trabalhos futuros uma abordagem multicritério, como destacado na Seção 4.2.

Além disso, deve-se aprofundar as análises a respeito da complexidade computacional deste tipo de problema. Apesar dos experimentos computacionais realizados neste estudo não apresentarem limitações quanto à capacidade computacional, a literatura aponta que se tratam de problemas *NP-Hard*, de difícil resolução. Sendo assim, sugere-se a realização de estudos voltados para métodos de otimização aproximativos, tais como heurísticas e meta-heurísticas, com a finalidade de obtenção de boas soluções com tempo computacional reduzido para problemas de grande porte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOUELJINANE, L.; SAHIN, E.; JEMAI, Z., 2013, “A review on simulation models applied to emergency medical service operations”. *Computers & Industrial Engineering*, v. 66, pp. 734-750.
- ABOUELJINANE, L.; SAHIN, E.; JEMAI, Z.; MARTY, J., 2014, “A simulation study to improve the performance of an emergency medical service: Application to the French Val-de-Marne department”. *Simulation Modeling Practice and Theory*, v. 47, pp. 46-59.
- ADENSO-DIAZ, B.; RODRIGUEZ, F., 1997, “A Simple search Heuristic for the MCLP: Application to the location of ambulance bases in a rural region”. *Omega*, v. 25, n. 2, p. 181–187.
- AICKELIN, U., 2002, “An indirect genetic algorithm for set covering problems”. *Journal of the Operational Research Society*, v. 53, n. 10, pp. 1118-1126.
- ALDRICH, C. A.; HISSERICH, J. C.; LAVE, L. B., 1971, “An analysis of the demand for emergency ambulance service in an urban area”. *American Journal of Public Health*, v. 61, n. 6, pp. 1156-1169.
- ALSALLOUM, O. I.; RAND, G. K., 2006, “Extensions to emergency vehicle location models”. *Computer & Operations Research*, v. 33, n. 9, pp. 2725-2743.
- ALUMUR, S. A.; YAMAN, H.; KARA, B. Y., 2012, “Hierarchical multimodal hub location problem with time-definite deliveries”. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 48, n. 6, pp. 1107-1120.
- ANSARI, S.; MCLAY, L. A.; MAYORGA, M. E., 2015, “A maximum expected covering problem for district design”. *Transportation Science*, pp. 1-15.
- ARAKAKI, R. G. I., 2003, *Heurística de localização-alocação para problemas de localização de facilidades*. Tese de Doutorado, Computação Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos/SP, 79 p.
- ARINGHIERI, R.; CARELLO, G.; MORALE, D., 2007, “Ambulance location through optimization and simulation: the case of Milano urban area”. In: *XXXVIII Annual Conference of the Italian Operations Research Society Optimization and Decision Sciences*, pp. 1-29, Genova, Oct.
- AYTUG, H.; SAYDAM, C., 2002, “Solving large-scale maximum expected covering location problems by genetic algorithms: a comparative study”. *European Journal of Operational Research*, v. 141, n. 3, pp. 480-494.

- BAKER, J. R.; FITZPATRICK, K. E., 1986, "Determination of an optimal forecast model for ambulance demand using goal programming". *Journal of Operational Research Society*, v. 37, n. 11, pp. 1047-1059.
- BALL, M. O.; LIN, F. L., 1993, "A reliability model applied to emergency service vehicle location". *Operations Research*, v. 41, pp. 18-36.
- BALLOU, R. H., 2006, *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial*. 5 ed. Porto Alegre/RS, Bookman.
- BANDARA, D.; MAYORGA, M. E.; MCLAY, L., 2014, "Priority dispatching strategies for EMS systems". *Journal of the Operational Research Society*, v. 65, pp. 572-587.
- BARRACHINA, J.; GARRIDO, P.; FOGUE, M.; MARTINEZ, F. J.; CANO, J. C.; CALAFATE, C. T.; MANZONI, P., 2014, "Reducing emergency services arrival time by using vehicular communications and evolution strategies". *Expert Systems with Applications*, v. 41, pp. 1206-1217.
- BATTA, R.; DOLAN, J. M.; KRISHNAMURTY, N. N., 1989, "The maximal expected covering location problem: revisited". *Transportation Science*, v. 23, pp. 277-287.
- BÉLANGER, V.; KERGOSIEN, Y.; RUIZ, A.; SORIANO, P., 2016, "An empirical comparison of relocation strategies in real-time ambulance fleet management". *Computers & Industrial Engineering*, v. 94, pp. 216-229.
- BERGE, C., 1957, "Two theorems in graph theory". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 43, n. 9, pp. 842-844.
- BILLHARDT, H.; LUJAK, M.; SÁNCHEZ-BRUNETE, V.; FERNÁNDEZ, A.; OSSOWSKI, S., 2014, "Dynamic coordination of ambulances for emergency medical assistance services". *Knowledge-Based Systems*, v. 70, pp. 268-280.
- BLACKWELL, T. H.; KAUFMAN, J. S., 1991, "Response time effectiveness: comparison of response time and survival in an urban emergency medical service system". *Academic Emergency Medicine*, v. 9, n. 4, pp. 288-295.
- BLACKWELL, T. H.; KAUFMAN, J. S., 2002, "Response time effectiveness: comparison of response time and survival in an urban emergency medical services system". *Academic Emergency Medicine*, v. 9, n. 4, pp. 288-295.
- BRANDEAU, M. L.; CHIU, S. S., 1989, "Overview of Representative Problems". *Management Science*, v. 6, n. 35, pp. 645-674.
- BRASIL, Ministério da Saúde, 2003a, Portaria GM/MS nº 1.863 de 29 de setembro de 2003. Institui a Política Nacional de Atenção às Urgências, a ser implantada em

todas as unidades federadas, respeitadas as competências das três esferas de gestão. Brasília, DF. Disponível em: <http://187.17.2.102/fhs/media/files/samu/politica_nacional_de_atencao_as_urgencias.pdf>. Acesso em: nov/2016.

BRASIL, Ministério da Saúde, 2003b, Portaria GM/MS nº 1.864 de 29 de setembro de 2003. Institui o componente pré-hospitalar móvel da Política Nacional de Atenção às Urgências, por intermédio da implantação de Serviços de Atendimento Móvel de Urgência em municípios e regiões de todo o território brasileiro: Samu 192. Brasília, DF. Disponível em: <http://187.17.2.102/fhs/media/files/samu/politica_nacional_de_atencao_as_urgencias.pdf>. Acesso em: nov/2016.

BRASIL, Ministério da Saúde, 2006, Política Nacional de Atenção às Urgências. 3 ed, Brasília, DF.

BRAY, J.E.; COUGHLAN, K.; BARGER, B.; BLADIN, C., 2010, “Paramedic diagnosis of stroke: examining long-term use of the Melbourne Ambulance Stroke Screen (MASS) in the field”. *Stroke*, v. 41, pp. 1363-1366.

BROTCORNE, L.; LAPORTE, S. G.; SEMET, F., 2003, “Ambulance location and relocation models”. *European Journal of Operational Research*, v. 147, pp. 451–463.

CADIGAN, R. T.; BUGARIN, C. E., 1989, “Predicting demand for emergency ambulance service”. *Annals of Emergency Medicine*, v. 18, n. 6, pp. 618-621.

CALIPER, 2008, TransCAD Transportation GIS Software – Routing and Logistics with TransCAD 5.0. Caliper Corporation, Newton, EUA.

CAMARA, M. V. O., 2016, *Modelagem matemática para localização de unidades de apoio para auxiliar pesquisas de tráfego rodoviário com múltiplos estágios*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 95 p.

CAMARA, M. V. O.; RIBEIRO, G. M.; QUADROS, S. G. R.; HORA, A.; NASCIMENTO, J. F.; ABRAMIDES, C. A., 2016, “Modelagem matemática aplicada no planejamento de pesquisa de tráfego rodoviário”. *Revista Produção Online*, v. 16, n. 2, pp. 722-742.

CHANNOUF, N.; L’ECUYER, P.; INGOLFSSON, A.; AVRAMIDIS, A. N., 2007, “The application of forecasting techniques to modeling emergency medical system calls in Calgary, Alberta”. *Health Care Management Science*, v. 10, n. 1, pp. 25-45.

- CHANTA, S.; MAYORGA, M. E.; MCLAY, L. A., 2014, "Improving emergency service in rural areas: a bi-objective covering location model for EMS systems". *Annals of Operations Research*, v. 221, n. 1, pp. 133-159.
- CHAVES, A. A.; CORREA, F. A.; LORENA, L. A. N., 2007, "Clustering Search Heuristic for the Capacitated p -Median Problem". *Springer Advances in Software Computing Series*, n. 44, pp. 136-143.
- CHEN, X.; LIAO, S. S.; DONG, W.; DAI, Y., YANG, X., 2014, "Focusing centrality measure in emergency medical services". *XVIII Pacific Asia Conference on Information Systems – PACIS*, 191, Chengdu, China, 24-28 Jun 2014.
- CHONG, K. C.; HENDERSON, G.; LEWIS, M. E., 2015, "The vehicle mix decision in emergency medical service systems". *Manufacturing & Service Operations Management*, v. 18, n. 3, pp. 1-14.
- CHUANG, P. T., 2001, "Combining the Analytic Hierarchy Process and Quality Function Deployment for Location Decision from a Requirement Perspective". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, n. 18, pp. 842-849.
- CHURCH, R.; REVELLE, C., 1974, "The maximal covering location problem". *Papers in Regional Science*, v. 32, n. 1, pp. 101-118.
- COSTA, M. G.; CAPTIVO, M. E.; CLÍMACO, J., 2008, "Capacitated single allocation hub location problem - A bi-criteria approach". *Computers & Operations Research*, v. 35, n. 11, pp. 3671-3695.
- CRAINIC, T.; LAPORTE, G., 1997, "Planning Models for Freight Transportation". *European Journal of Operational Research*, n. 97, pp. 409-438.
- CRETIN, S.; WILLEMAIN, T. R., 1979, "A model of prehospital death from ventricular fibrillation following myocardial infarction". *Health Services Research*, v. 14, n. 3, pp. 221-234.
- CURRENT, J.; O'KELLY, M., 1992, "Locating emergency warnings sirens". *Decision Sciences*, v. 23, n. 1, p. 221-234.
- DANTRAKUL, S.; LIKASIRI, C.; PONGVUTHITHUM, R., 2014, "Applied p -median and p -center algorithms for facility location problems". *Expert Systems with Applications*, v. 41, pp. 3596-3604.
- DASKIN, M. S., 1983, "A maximum expected covering location model: formulation, properties and heuristic solution". *Transportation Science*, v. 17, n. 1, pp. 48-70.
- DASKIN, M. S.; STERN, E. H., 1981, "A hierarchical objective set covering model for emergency medical service vehicle deployment". *Transportation Science*, v. 15, pp.

137-152.

- DIAZ, J. A.; FERNANDEZ, E., 2006, “Hybrid Scatter Search and Path Relinking for the Capacitated p-Median Problem”. *European Journal of Operational Research*, n. 169, pp. 570–585.
- DOERNER, K. F.; GUTJAHR, W. J.; HARTL, R. F.; KARALL, M.; REIMANN, M., 2005, “Heuristic solution of an extended double-coverage ambulance location problem for Austria”. *Central European Journal of Operations Research*, v. 13, n. 4, pp. 325-340.
- EARNEST, A.; ONG, M. E. H.; SHAHIDAH, N.; NG, W. M.; FOO, C.; NOTT, D. J., 2012, “Spatial analysis of ambulance response times related to prehospital cardiac arrests in the city-state of Singapore”. *Prehospital Emergency Care*, v. 16, n. 2, pp. 256-265.
- EATON, D.; HECTOR, M.; SANCHEZ, V., 1986, “Determining ambulance deployment in Santo Domingo, Dominican Republic”. *Journal of the Operational Research Society*, v. 37, n. 2, p. 113–126.
- EISENBERG, M.; BERGER, L.; HALSTROM, A., 1979, “Paramedic programs and out-of-hospital cardiac arrest: Factors associated with successful prehospital resuscitation”. *American Journal of Public Health*, v. 69, n. 1, pp. 30-38.
- ELVIK, R.; HOYE, T.; VAA, M.; SORENSEN, M., 2009, *The Handbook of Road Safety Measures*. 2 ed. Bingley, Emerald Group Publishing.
- ERKUT, E.; INGOLFSSON, A.; ERDOĞAN, G., 2008, “Ambulance location for maximum survival”. *Naval Research Logistics*, v. 55, n. 1, pp. 42-58.
- FALLAH, H.; NAIMISADIGH, A.; ASLANZADEH, M., 2009, “Covering problem”. In: Farahani, R. Z., Hekmatfar, M. (eds), *Facility location: Concepts, models, algorithms and case studies*, chapter 6, Heidelberg, Germany, Physica Verlag.
- FARAHANI, R. Z.; ASGARI, N.; HEIDARI, N.; HOSSEININIA, M.; GOH, M., 2012, “Covering problems in facility location: A review”. *Computers & Industrial Engineering*, v. 62, pp. 368-407.
- FELDER, S.; BRINKMANN, H., 2002, “Spatial allocation of emergency medical services: minimizing the death rate or providing equal access?”. *Regional Science and Urban Economics*, v. 32, n. 1, pp. 27-45.
- FERRARI, T.; CAMARA, M. V. O.; NASSI, C. D.; RIBEIRO, G. M., 2016, “Análise das variáveis explicativas para ocorrências de acidentes de trânsito em âmbito urbano: um estudo de caso no município do Rio de Janeiro”. *Congreso*

- Latinoamericano de Transporte Público y Urbano*, Montevideo, Uruguay, 7-11 Noviembre 2016.
- FERRI, G. L.; CHAVES, G. L. D.; RIBEIRO, G. M., 2015, “Reverse logistics network for municipal solid waste management: The inclusion of waste pickers as a Brazilian legal requirement”. *Waste Management*, v. 40, pp. 173-191.
- FITZSIMMONS, J. A., 1973, “A methodology for emergency ambulance deployment”. *Management Science*, v. 19, n. 6, pp. 627-636.
- FRANCIS, R. L.; LOWE, T. J.; RAYCO, M. B.; TAMIR, A., 2009, “Aggregation error for location models: survey and analysis”. *Annals of Operations Research*, v. 167, pp. 171-208.
- GALVÃO, R. D.; CHIYOSHI, F.; MORABITO, R., 2005, “Towards unified formulations and extensions of two classical probabilistic location model”. *Computers & Operations Research*, v. 32, pp. 15–33.
- GALVÃO, R. D.; REVELLE, C., 1996, “A Lagrangean heuristic for the maximal covering location problem”. *European Journal of Operational Research*, v. 88, n. 1, pp. 114-123.
- GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S., 1979, *Computers and Intractability: a Guide to the Theory of NP-Completeness*. San Francisco, Freeman.
- GELAREH, S.; MONEMI, R. N.; NICKEL, S., 2015, “Multi-period hub location problems in transportation”. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 75, pp. 67-94.
- GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; SEMET, F., 1997, “Solving an ambulance location model by tabu search”. *Location science*, v. 5, n. 2, pp. 75-88.
- GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; SEMET, F., 2001, “A dynamic model and parallel Tabu search heuristic for real-time ambulance relocation”. *Parallel Computing*, v. 27, pp. 1641–1653.
- GOLD, P. A., 1998, *Segurança de trânsito: aplicação de engenharia para reduzir acidentes*. Washington, Banco Interamericano de Desenvolvimento.
- GOLDBERG, J. B., 2004, “Operations research models for the deployment of emergency services vehicles”. *EMS Management Journal*, v. 1, n. 1, pp. 20-39.
- GOLDBERG, J. B.; DIETRICH, R.; CHEN, J. M.; MITWASI, M. G.; VALENZUELA, T.; CRISS, E., 1990, “Validating and applying a model for locating emergency medical vehicles in Tucson, AZ”. *European Journal of Operational Research*, v. 49, pp. 308–324.

- HAKIMI, S. L., 1964, “Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph”. *Operations research*, v. 12, n. 3, pp. 450-459.
- HAKIMI, S. L., 1965, “Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems”. *Operations Research*, v. 13, n. 3, pp. 462-475.
- HAMON, B.; EATON, D.; CHURCH, R., 1979, “Development of a Multi-purpose ambulance system”. *Modelling and Simulation*, v. 10, p. 1437–1445.
- HANSAGI, H.; OLSSON, M.; SJOBERG, S.; TOMSON, Y.; GORANSSON, S., 2001, “Frequent use of the hospital emergency department is indicative of high use of other health care services”. *Annals of Emergency Medicine*, v. 37, n. 6, pp. 561-567.
- HOGAN, K.; REVELLE, C. S., 1986, “Concepts and applications of backup coverage”. *Management Science*, v. 34, pp. 1434-1444.
- HOLLIMAN, J., 2010, “Standard EMS terms and definitions”. In: Tintinalli, J.; Cameron, P.; Holliman, J. (eds), *EMS: A practical global guidebook*, chapter 1, Shelton, Connecticut, USA, People’s Medical Publishing House.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2011, Indicadores sociais municipais: uma análise dos resultados do universo do censo demográfico 2010. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv54598.pdf>>. Acesso em: nov/2016.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2016, Cidades: Rio de Janeiro – Informações completas. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=330455&search=rio-de-janeiro|rio-de-janeiro|infograficos:-informacoes-completas>>. Acesso em: nov/2016.
- IBM, 2015, IBM ILOG CPLEX, versão 12.6, Sunnyvale, California.
- IBRI, S.; NOURELFATH, M.; DRIAS, H., 2012, “A multi-agent approach for integrated emergency vehicle dispatching and covering problem”. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 25, pp. 554-565.
- INGOLFSSON, A.; BUDGE, S.; ERKUT, E., 2008, “Optimal ambulance location with random delays and travel times”. *Health Care Management Science*, v. 11, pp. 262-274.
- INGOLFSSON, A.; ERKUT, E.; BUDGE, S., 2003, “Simulation of single start station

- for Edmonton EMS”. *Journal of Operational Research Society*, v. 54, n. 7, pp. 736-746.
- IRAWAN, C. A.; SALHI, S., 2015, “Aggregation and non aggregation techniques for large facility location problems – a survey”. *Yugoslav Journal of Operations Research*, v. 25, n. 3, pp. 313-341.
- IRAWAN, C. A.; SALHI, S.; SCAPARRA, M. P., 2014, “An adaptive multiphase approach for large unconditional and conditional p-median problems”. *European Journal of Operational Research*, v. 237, pp. 590-605.
- ISP, 2012, “Dossiê trânsito 2012”. Instituto de Segurança Pública, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- JAGTENBERG, C. J.; BHULAI, S.; VAN DER MEI, R. D., 2015, “An efficient heuristic for real-time ambulance redeployment”. *Operations Research for Health Care*, v. 4, pp. 27-35.
- JIA, H.; ORDÓÑEZ, F.; DESSOUKV, M. M., 2007, “Solution approaches for facility location of medical supplies for large-scale emergencies”. *Computers & Industrial Engineering*, v. 52, pp. 257–276.
- KAMENETZKY, R. D.; SHUMAN, L. J.; WOLFE, H., 1982, “Estimating need and demand for prehospital care”. *Operations Research*, v. 30, n. 6, pp. 1148-1167.
- KARASAKAL, O.; KARASAKAL, E. K., 2004, “A maximal covering location model in the presence of partial coverage”. *Computers & Operations Research*, v. 31, n. 9, pp. 1515-1526.
- KVALSETH, T. O.; DEEMS, J. M., 1979, “Statistical models of the demand for emergency medical services in an urban area”. *American Journal of Public Health*, v. 69, n. 3, pp. 250-255.
- KERGOSIEN, Y.; BÉLANGER, V.; SORIANO, P.; GENDREAU, M.; RUIZ, A., 2015, “A generic and flexible simulation-based analysis tool for EMS management”. *International Journal of Production Research*, v. 53, n. 24, pp. 7299-7316.
- KLOSE, A.; DREXL, A., 2005, “Facility location models for distribution system design”. *European Journal of Operational Research*, v. 162, pp. 4–29.
- KNIGHT, V. A.; HARPER, P. R.; SMITH, L., 2012, “Ambulance allocation for maximal survival with heterogeneous outcome measures”. *Omega*, v. 40, pp. 918-926.
- KRARUP, J.; PRUZAN, P.M., 1990, “Ingredients of Location Analysis”. In: Mirchandani, P.B. e Francis, R.L. (Eds) *Discrete Location Theory*, New York, John Wiley, pp. 1-54.

- LAM, S. S. W.; ZHANG, J.; ZHANG, Z. C.; OH, H. C.; OVERTON, J.; NG, Y. Y.; ONG, M. E. H., 2015, “Dynamic ambulance reallocation for the reduction of ambulance response times using systems status management”. *American Journal of Emergency Medicine*, v. 33, pp. 159-166.
- LERNER, E.; NICHOL, G.; SPAITE, D. W.; GARRISON, H. G.; MAIO, R. F., 2007, “A comprehensive framework for determining the cost of an emergency medical services system”. *Annals of Emergency Medicine*, v. 49, n. 3, pp. 304-313.
- LEVINE, N.; KIM, K. E.; NITZ, L. H., 1995, “Spatial Analysis of Honolulu Motor Vehicle Crashes: I. Spatial Patterns”. *Accidents Analysis and Prevention*, v. 27, n. 5, pp. 663-667.
- LI, X.; ZHAO, Z.; ZHU, X.; WYATT, T., 2011, “Covering models and optimization techniques for emergency response facility location and planning: a review”. *Mathematical Methods of Operations Research*, v. 74, n. 3, pp. 281-310.
- LORENA, L. A. N.; SENNE, E. L. F., 2004, “A column generation approach to capacitated p-median problems”. *Computers & Operations Research*, v. 31, n. 6, pp. 863-876.
- LORENA, L. A. N.; SENNE, E. L. F.; PAIVA, J. A. C.; PEREIRA, M. A., 2001, “Integração de Modelos de Localização a Sistemas de Informações Geográficas”. *Gestão e Produção*, v. 8, n. 2. Departamento de Engenharia de Produção – DEP, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos/SP, pp. 180-195.
- MACIAK, I.; SANDRI, J.; SPIER, F., 2009, “Humanização da assistência de enfermagem em uma unidade de emergência: percepção do usuário”. *Cogitare Enfermagem*, v. 14, n. 1, pp. 127-135.
- MALEKI, M.; MAJLESINASAB, N.; SEPEHRI, M. M., 2014, “Two new models for redeployment of ambulances”. *Computers & Industrial Engineering*, v. 78, pp. 271-284.
- MALVESTIO, M. A. A., 2005, *Predeterminantes de sobrevivência em vítimas de acidentes de trânsito submetidas a atendimento pré-hospitalar de suporte avançado à vida*. 2005. 163 p. Tese de Doutorado, Escola de Enfermagem, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- MANDELL, M. B., 1998, “Covering models for two-tiered emergency medical services systems”. *Location Science*, v. 6, pp. 355-368.
- MAPA, S. M. S.; LIMA, R. S., 2012, “Uso combinado de sistemas de informações geográficas para transportes e programação linear inteira mista em problemas de

- localização de instalações”. *Gestão & Produção*, v. 19, n. 1, pp. 119-136.
- MARIANOV, V.; REVELLE, C. S., 1994, “The queueing probabilistic location set covering problem and some extensions”. *Socio-Economic Planning Sciences*, v. 28, pp. 167-178.
- MAYER, J. D., 1979, “Emergency medical service delays, response time, and survival”. *Medical Care*, v. 17, n. 8, pp. 818-827.
- MAYORGA, M. E.; BANDARA, D.; MCLAY, L. A., 2013, “Districting and dispatching policies for emergency medical service systems to improve patient survival”. *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, v. 3, n. 1, pp. 39-56.
- MELO, M. T.; NICKEL, S.; SALDANHA-DA-GAMA, F., 2009, “Facility Location and Supply Chain Management – A Review”. *European Journal of Operational Research*, v. 2, n. 196, pp. 401–412.
- MINAYO, M. C. S.; DESLANDES, S. F., 2008, “Análise da implantação do sistema de atendimento pré-hospitalar móvel em cinco capitais brasileiras (Analysis of the implementation of a mobile pre-hospital treatment system in five Brazilian state capitals)”. *Caderno de Saúde Pública*, v. 24, n. 8, pp. 1877-1886.
- MLADENOVIC, N.; LABBÉ, M.; HANSEN, P., 2003, “Solving the p-Center Problem with Tabu Search and Variable Neighborhood Search”. *Networks*, v. 42, n. 1, pp. 48- 64.
- MOORE, L., 2009, “Performance measurement in EMS”. In: LERNER, E.; PIRALLO, R.; SWOR, R.; WHITE, L. (eds) *Evaluating and improving quality in EMS*. Kendall Hunt Professional, pp. 80-89.
- NAIR, R.; MILLER-HOOKS, E., 2009, “Evaluation of relocation strategies for emergency medical service vehicles”. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 2137, pp. 63-73.
- NDIAVE, M.; ALFARES, H., 2008 “Modeling health care facility location for moving population groups”. *Computers & Operations Research*, v. 35, pp. 2154-2161.
- NEGREIROS, M.; PALHANO, A., 2006, “The capacitated centred clustering problem”. *Computers & Operations Research*, v. 33, n. 6, pp. 1639-1663.
- O’KEEFE, C.; NICHOLL, J.; TURNER, J.; GOODACRE, S., 2010, “Role of ambulance response times in the survival of patients with out-of-hospital cardiac arrest”. *Emergency Medicine Journal*, v. 28, n. 8, pp. 703-706.
- ONG, M. E. H.; NG, F. S. P.; OVERTON, J.; YAP, S.; ANDRESEN, D.; YONG, D. K. L.; LIM, W. H.; ANANTHARAMAN, V., 2009, “Geographic-time distribution of

- ambulance calls in Singapore: utility of geographic information system in ambulance deployment (CARE 3)". *Annals Academy of Medicine Singapore*, v. 38, n. 3, pp. 184-191.
- OWEN, S. H.; DASKIN, M. S., 1998, "Strategic facility location: a review". *European Journal of Operational Research*, v. 111, n. 3, pp. 423-447.
- PANTRIDGE, J. F.; GEDDES, J. S., 1967, "A mobile intensive-care unit in the management of myocardial infarction". *Lancet*, v. 2, pp. 271-273.
- POZNER, C. N.; ZANE, R.; NELSON, S. J.; LEVINE, M., 2004, "International EMS systems: the United States - past, present, and future". *Resuscitation*, v. 60; pp. 239-244.
- RAJAGOPALAN, H. K.; SAYDAM, C.; XIAO, J., 2008, "A multiperiod set covering location model for dynamic redeployment of ambulances". *Computers & Operations Research*, v. 35, n. 3, pp. 814-826.
- REBREYEND, P.; LEMARCHAND, L.; EULER, R., 2015, "A Computational Comparison of Different Algorithms for Very Large p-median Problems". In: *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*. Springer International Publishing, 2015. pp. 13-24.
- REINES, H. D.; BARTLETT, R.; CHUDY, N. E.; KIRAGU, K.R.; MCKNEW, M. A., 1988, "Is advanced life support appropriate for victims of motor vehicle accidents: the South Carolina highway trauma project". *The Journal of Trauma*, v. 28, n. 5, pp. 563-570.
- REINES, H. D.; DUFFY, K.; YARBROUGH, D., 1984, "The effect of transit time on mortality from major trauma". *Journal of Trauma – Injury Infection and Critical Care*, v. 24, n. 7, pp. 530.
- REPEDE, J. F.; BERNARDO, J. J., 1994, "Developing and validating a decision support system for locating emergency medical vehicles in Louisville, Kentucky". *European Journal of Operational Research*, v. 75, pp. 567-581.
- REVELLE, C. S.; EISELT, H. A.; DASKIN, M. S., 2008, "A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science". *European Journal of Operational Research*, v. 184, pp. 817-848.
- REVELLE, C. S.; HOGAN, K., 1989, "The maximum availability location problem". *Transportation Science*, v. 23, n. 3, pp. 192-200.
- ROCHA, M. M., 2015, *Análise espacial de acidentes de trânsito no contexto de variáveis agregadas em áreas: proposta metodológica e aplicação na cidade do Rio de*

- Janeiro*. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 156 p.
- ROMERO, B. C., 2006, *Análise de Localização de Plataformas Logísticas: Aplicação ao Caso do ETSP – Entrepasto Terminal São Paulo da CEAGESP*. Dissertação de Mestrado, Engenharia de Sistemas Logísticos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – POLI/USP, São Paulo/SP, 143 p.
- SÁNCHEZ-MANGAS, R.; GARCÍA-FERRER, A.; DE JUAN, A.; ARROYO, A. M., 1993, “The probability of death in road traffic accidents. How important is a quick medical response?”. *Accident Analysis and Prevention*, v. 42, n. 4, pp. 1048-1056.
- SAVAS, E. S., 1969, “Simulation and cost-effectiveness analysis of New York’s emergency ambulance service”. *Management Science*, v. 51, n. 12, pp. B608–B627.
- SCHILLING, D. A.; ELZINGA, D. J.; COHON, J.; CHURCH, R. L.; REVELLE, C. S., 1979, “The TEAM/FLEET models for simultaneous facility and equipment siting”. *Transportation Science*, v. 13, pp. 163–175.
- SCHILLING, D. A.; JAYARAMAN, V.; BARKHI, R., 1993, “A review of covering problem in facility location”. *Location Science*, v. 1, n. 1, pp. 25–55.
- SCHMID, V.; DOERNER, K. F., 2010, “Ambulance location and relocation problems with time-dependent travel times”. *European journal of operational research*, v. 207, n. 3, pp. 1293-1303.
- SCHNEEBERGER, K.; DOERNER, K. F.; KURZ, A.; SCHILDE, M., 2016, “Ambulance location and relocation models in a crisis”. *Central European Journal of Operations Research*, v. 24, n. 1, pp. 1-27.
- SEEDAT, M.; VAN NIEKERK, A.; JEWKERS, R.; SUFFLA, S.; RATELE, K., 2009, “Violence and injuries in South Africa: Prioritizing an agenda for prevention”. *Lancet*, v. 374, n. 9694, pp. 1011–1022.
- SENNE, E. L. F.; LORENA, L. A. N.; PEREIRA, M. A., 2005, “A branch-and-price approach to p-median location problems”. *Computers & Operations Research*, v. 32, n. 6, pp. 1655-1664.
- SETZLER, H.; SAYDAM, C.; PARK, S., 2009, “EMS call volume predictions: a comparative study”. *Computer & Operations Research*, v. 36, pp. 1843-1851.
- SHARIAT-MOHAYMANY, A.; BABAEI, M.; MOADI, S.; AMIRIPOUR, S. M., 2012, “Linear upper-bound unavailability set covering models for locating ambulances: Application to Tehran rural roads”. *European Journal of Operational Research*, v. 221, pp. 263–272.

- SHARIFF, S. S. R.; MOIN, N. H.; OMAR, M., 2012, "Location allocation modeling for healthcare facility planning in Malaysia". *Computers & Industrial Engineering*, v. 62, pp. 1000-1010.
- SILVA, N. C.; NOGUEIRA, L. T., 2012, "Avaliação de indicadores operacionais de um Serviço de Atendimento Móvel de Urgência". *Cogitare Enfermagem*, v. 17, n. 3, pp. 471-477.
- STEIN, A. T.; HARZHEIM, E.; COSTA, M.; BUSNELLO, E.; RODRIGUES, L. C., 2002, "The relevance of continuity of care: a solution for the chaos in the emergency services". *Family Practice*, v. 19, n. 2, pp. 207-210.
- STEIN, C.; WALLIS, L.; ADETUNJI, O., 2015, "The effect of the emergency medical services vehicle location and response strategy on response times". *South African Journal of Industrial Engineering*, v. 26, n. 2, pp. 26-40.
- STIELL, I. G.; NESBITT, L. P.; PICKETT, W.; MUNKLEY, D.; SPAITE, D. W.; BANEK, J.; FIELD, B.; LUINSTRATO, L.; MALONEY, J.; DREYER, J.; LYVER, M.; CAMPEAU, T.; WELLS, G. A., 2008, "The OPALS Major Trauma Study: impact of advanced life-support on survival and morbidity". *Canadian Medical Association Journal*, v. 178, n. 9, pp. 1141-1152.
- SU, Q.; LUO, Q.; HUANG, S. H., 2015, "Cost-effective analyses for emergency medical services deployment: a case study in Shanghai". *International Journal of Production Economics*, v. 163, pp. 112-123.
- SUDTACHAT, K.; MAYORGA, M. E.; MCLAY, L. A., 2014, "Recommendations for dispatching emergency vehicles under multitiered response via simulation". *International Transactions in Operational Research*, v. 21, n. 4, pp. 581-617.
- SUDTACHAT, K.; MAYORGA, M. E.; MCLAY, L. A., 2016, "A nested-compliance table policy for emergency medical service systems under relocation". *Omega*, v. 58, pp. 154-168.
- SUZUKI, A.; DREZNER, Z., 1996, "The p-center location problem in an area". *Location science*, v. 4, n. 1, pp. 69-82.
- TAKEDA, R. A.; WIDMER, J. A.; MORABITO, R., 2007, "Analysis of ambulance decentralization in an urban emergency medical service using the hypercube queueing model". *Computers & Operations Research*, v. 34, pp. 727-741.
- TANSEL, B. C.; FRANCIS, R. L.; LOWE, T. J., 1983, "State of the art-location on networks: a survey. Part I: the p-center and p-median problems". *Management Science*, v. 29, n. 4, pp. 482-497

- TIMM, A.; MAEGELE, M.; LEFERING, R.; WENDT, K.; WYEN, H., 2014, “Pre-hospital rescue times and actions in severe trauma. A comparison between two trauma systems: Germany and the Netherlands”. *Injury*, v. 45, pp. S43-S52.
- TOREGAS, C.; SWAIN, R.; REVELLE, C.; BERGMAN, L., 1971, “The location of emergency service facilities”. *Operations Research*, v. 19, n. 6, pp. 1363-1373.
- TORO-DÍAZ, H.; MAYORGA, M. E.; MCLAY, L. A.; RAJAGOPALAN, H. K.; SAYDAM, C., 2015, “Reducing disparities in large-scale emergency medical service systems”. *Journal of the Operational Research Society*, v. 66, n. 7, pp. 1169-1181.
- VUKMIR, R. B., 2006, “Survival from prehospital cardiac arrest is critically dependent upon response time”. *Resuscitation*, v. 69, n. 2, pp. 229-234.
- WALLIS, L. A.; GARACH, S. R.; KROPMAN, A., 2008, “State of emergency medicine in South Africa”. *International Journal of Emergency Medicine*, v. 1, n. 2, pp. 69-71.
- WILDE, E. T., 2013, “Do emergency medical system response times matter for health outcomes?”. *Health Economics*, v. 22, pp. 790-806.
- WOODHOUSE, S.; LOVETT, A.; DOLMAN, P.; FULLER, R., 2000, “Using a GIS to select priority areas for conservation”. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 24, n. 2, p. 79–93.
- YAGHINI, M.; KARIMI, M.; RAHBAR, M., 2013, “A hybrid metaheuristic approach for the capacitated p-median problem”. *Applied Soft Computing*, v. 13, n. 9, p. 3922-3930.
- YIN, P.; MU, L., 2012, “Modular capacitated maximal covering location problem for the optimal siting of emergency vehicles”. *Applied Geography*, v. 34, pp. 247-254.

APÊNDICE A – PERCENTUAL DE UTILIZAÇÃO DAS BASES DE DESPACHO DE VEÍCULOS DE RESGATE POR CENÁRIO

Os IDs das bases de despacho de veículos de resgate (pré-existentes e novas bases), os nomes das bases, a Área de Planejamento (AP) em que estão localizadas e seu percentual de utilização estão relacionados para o Cenário 1 (cenário-base), Cenários 2 a 6 e Cenários 7 a 11, respectivamente, nas Tabela A.1, A.2 e A.3.

Tabela A.1 – Percentual de utilização das bases de despacho no cenário-base

ID	Base	AP	Percentual de Utilização
	Nome		Cenário 1
1	Central	AP 1	100,00%
2	Humaitá	AP 2	92,50%
3	Catete	AP 2	99,95%
4	Gávea	AP 2	71,16%
5	Méier	AP 3	92,24%
6	Ramos	AP 3	99,87%
7	Campinho	AP 3	94,75%
8	Realengo	AP 5	99,96%
9	Vila Isabel	AP 2	92,01%
10	Grajaú	AP 2	72,95%
11	Tijuca	AP 2	94,11%
12	Jacarepaguá	AP 4	89,95%
13	Campo Grande	AP 5	99,99%
14	Santa Cruz	AP 5	96,07%
15	Guaratiba	AP 5	59,19%
16	Copacabana	AP 2	84,13%
17	Ilha do Governador	AP 3	67,98%
18	Fundão	AP 3	22,61%
19	Irajá	AP 3	96,80%
20	Ricardo de Albuquerque	AP 3	80,32%
21	Parada de Lucas	AP 3	97,86%
22	Penha	AP 3	74,19%
23	Guadalupe	AP 5	99,81%
24	Barra da Tijuca	AP 4	83,43%
25	Recreio	AP 4	56,31%
26	Joá	AP 4	44,76%
27	Alto da Boa Vista	AP 2	13,87%
28	Santa Teresa	AP 1	30,52%
29	Caju	AP 1	61,99%
30	GMAR Botafogo	AP 2	82,86%
31	Paquetá	AP 1	4,20%
32	GMAR Ramos	AP 3	99,37%
33	GMAR Barra da Tijuca	AP 4	62,98%
34	GMAR Barra de Guaratiba	AP 5	2,94%
35	GMAR Sepetiba	AP 5	40,80%
36	GMAR Copacabana	AP 2	27,62%

Tabela A.2 – Percentual de utilização das bases de despacho nos Cenários 2 a 6

ID	Base		Percentual de Utilização				
	Nome	AP	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
1	Central	AP 1	100,00%	99,97%	100,00%	99,98%	99,99%
2	Humaitá	AP 2	99,09%	92,51%	96,20%	95,82%	99,81%
3	Catete	AP 2	92,22%	92,22%	92,22%	92,22%	99,95%
4	Gávea	AP 2	99,94%	71,16%	99,92%	100,00%	99,95%
5	Méier	AP 3	92,24%	95,35%	96,54%	98,78%	99,99%
6	Ramos	AP 3	99,94%	83,94%	99,80%	99,87%	99,99%
7	Campinho	AP 3	95,34%	99,99%	96,56%	99,98%	100,00%
8	Realengo	AP 5	99,95%	99,99%	92,68%	92,68%	99,97%
9	Vila Isabel	AP 2	87,26%	87,26%	94,35%	95,52%	99,92%
10	Grajaú	AP 2	72,95%	72,95%	99,98%	99,98%	99,85%
11	Tijuca	AP 2	90,77%	90,97%	94,71%	94,91%	99,91%
12	Jacarepaguá	AP 4	99,86%	100,00%	99,86%	100,00%	99,97%
13	Campo Grande	AP 5	99,97%	97,28%	97,09%	97,09%	99,92%
14	Santa Cruz	AP 5	96,07%	95,21%	95,60%	87,76%	87,76%
15	Guaratiba	AP 5	58,03%	52,18%	52,18%	52,18%	28,56%
16	Copacabana	AP 2	99,98%	97,94%	99,97%	99,82%	99,99%
17	Ilha do Governador	AP 3	99,95%	99,95%	99,98%	99,95%	99,98%
18	Fundão	AP 3	26,65%	28,01%	26,59%	33,79%	73,57%
19	Irajá	AP 3	96,80%	99,92%	99,99%	97,54%	99,99%
20	Ricardo de Albuquerque	AP 3	79,86%	79,86%	79,86%	92,12%	86,92%
21	Parada de Lucas	AP 3	97,86%	99,40%	99,95%	98,34%	99,95%
22	Penha	AP 3	73,92%	99,79%	99,99%	74,77%	99,97%
23	Guadalupe	AP 5	88,67%	92,81%	88,37%	99,95%	99,99%
24	Barra da Tijuca	AP 4	61,77%	85,97%	63,10%	61,77%	99,98%
25	Recreio	AP 4	56,31%	56,31%	56,31%	56,31%	56,31%
26	Joá	AP 4	99,97%	99,73%	99,36%	99,68%	99,46%
27	Alto da Boa Vista	AP 2	17,64%	20,20%	17,64%	19,70%	63,26%
28	Santa Teresa	AP 1	-	-	-	-	-
29	Caju	AP 1	62,30%	99,97%	62,38%	99,98%	99,92%
30	GMAR Botafogo	AP 2	66,26%	65,62%	65,90%	65,62%	99,95%
31	Paquetá	AP 1	4,20%	4,20%	4,20%	4,20%	4,20%
32	GMAR Ramos	AP 3	99,37%	99,46%	99,37%	99,97%	99,93%
33	GMAR Barra da Tijuca	AP 4	-	-	-	-	-
34	GMAR Barra de Guaratiba	AP 5	2,94%	2,94%	2,94%	2,94%	2,94%
35	GMAR Sepetiba	AP 5	40,80%	40,80%	40,80%	40,80%	38,76%
36	GMAR Copacabana	AP 2	-	-	-	-	-
37	Fictícia	AP 5	-	99,69%	99,86%	99,86%	99,85%
39	Fictícia	AP 5	-	-	-	67,15%	61,52%
42	Fictícia	AP 5	-	-	-	-	50,37%
43	Fictícia	AP 5	-	-	-	-	50,87%
44	Fictícia	AP 5	-	-	-	-	90,68%
47	Fictícia	AP 5	-	-	87,24%	87,24%	99,90%
48	Fictícia	AP 5	78,19%	78,33%	83,65%	83,65%	99,87%
55	Fictícia	AP 5	-	-	-	-	24,93%
56	Fictícia	AP 4	-	-	-	-	17,16%
57	Fictícia	AP 4	95,74%	99,70%	96,73%	96,90%	99,95%

Tabela A.3 – Percentual de utilização das bases de despacho nos Cenários 7 a 11

Base		AP	Percentual de Utilização				
ID	Nome		Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10	Cenário 11
1	Central	AP 1	70,83%	99,95%	99,94%	100,00%	100,00%
2	Humaitá	AP 2	91,62%	98,27%	99,50%	92,51%	99,31%
3	Catete	AP 2	88,89%	90,19%	91,84%	92,22%	92,22%
4	Gávea	AP 2	71,16%	99,91%	99,95%	71,16%	99,92%
5	Méier	AP 3	92,24%	92,24%	92,24%	94,14%	96,22%
6	Ramos	AP 3	99,97%	99,82%	99,89%	99,93%	99,77%
7	Campinho	AP 3	94,63%	94,63%	94,63%	95,22%	99,98%
8	Realengo	AP 5	99,96%	99,97%	92,68%	92,68%	92,68%
9	Vila Isabel	AP 2	86,36%	89,84%	87,94%	87,26%	94,35%
10	Grajaú	AP 2	72,95%	72,95%	72,95%	72,95%	99,98%
11	Tijuca	AP 2	89,90%	89,90%	90,43%	90,77%	94,71%
12	Jacarepaguá	AP 4	78,54%	78,54%	78,54%	99,86%	99,86%
13	Campo Grande	AP 5	99,99%	96,21%	96,21%	96,21%	99,95%
14	Santa Cruz	AP 5	96,07%	92,70%	92,70%	84,86%	87,76%
15	Guaratiba	AP 5	57,93%	52,18%	52,18%	52,18%	28,56%
16	Copacabana	AP 2	97,94%	99,78%	99,80%	97,94%	99,53%
17	Ilha do Governador	AP 3	67,98%	67,98%	67,98%	67,98%	99,95%
18	Fundão	AP 3	22,61%	22,61%	23,19%	31,64%	26,65%
19	Irajá	AP 3	96,80%	96,80%	96,80%	96,80%	97,54%
20	Ricardo de Albuquerque	AP 3	81,69%	81,65%	79,86%	79,86%	92,54%
21	Parada de Lucas	AP 3	97,86%	97,86%	97,86%	97,86%	98,34%
22	Penha	AP 3	73,47%	74,24%	73,81%	98,19%	74,29%
23	Guadalupe	AP 5	89,28%	90,13%	88,37%	88,37%	99,98%
24	Barra da Tijuca	AP 4	61,77%	61,77%	61,77%	61,77%	61,77%
25	Recreio	AP 4	56,31%	56,31%	56,31%	56,31%	56,31%
26	Joá	AP 4	53,30%	55,59%	99,30%	99,71%	99,64%
27	Alto da Boa Vista	AP 2	13,87%	13,87%	17,64%	17,64%	17,64%
28	Santa Teresa	AP 1	-	-	-	-	-
29	Caju	AP 1	62,51%	61,72%	61,72%	66,32%	61,99%
30	GMAR Botafogo	AP 2	65,62%	66,51%	65,62%	65,62%	66,00%
31	Paqueta	AP 1	4,20%	4,20%	4,20%	4,20%	4,20%
32	GMAR Ramos	AP 3	99,64%	99,37%	99,88%	99,96%	99,37%
33	GMAR Barra da Tijuca	AP 4	-	-	-	-	-
34	GMAR Barra de Guaratiba	AP 5	2,94%	2,94%	2,94%	2,94%	2,94%
35	GMAR Sepetiba	AP 5	40,80%	40,80%	40,80%	40,80%	38,76%
36	GMAR Copacabana	AP 2	-	-	-	-	-
37	Fictícia	AP 5	-	55,05%	55,05%	55,05%	99,85%
39	Fictícia	AP 5	-	-	-	67,15%	61,52%
42	Fictícia	AP 5	-	-	-	-	50,37%
43	Fictícia	AP 5	-	-	-	-	50,87%
44	Fictícia	AP 5	-	-	-	-	90,02%
47	Fictícia	AP 5	-	-	87,24%	87,24%	87,24%
48	Fictícia	AP 5	76,35%	75,22%	83,65%	83,65%	83,65%
55	Fictícia	AP 5	-	-	-	-	24,93%
56	Fictícia	AP 4	-	-	-	-	17,16%
57	Fictícia	AP 4	90,36%	90,36%	92,85%	95,27%	96,66%

APÊNDICE B – MAPAS DE COBERTURA DOS CENÁRIOS 7 A 11

Os mapas temáticos de cobertura que contém a área de cobertura das bases de despacho de veículos abertas e utilizadas nos Cenários 7, 8, 9, 10 e 11 podem ser visualizados nas Figuras B.1, B.2, B.3, B.4 e B.5, respectivamente.

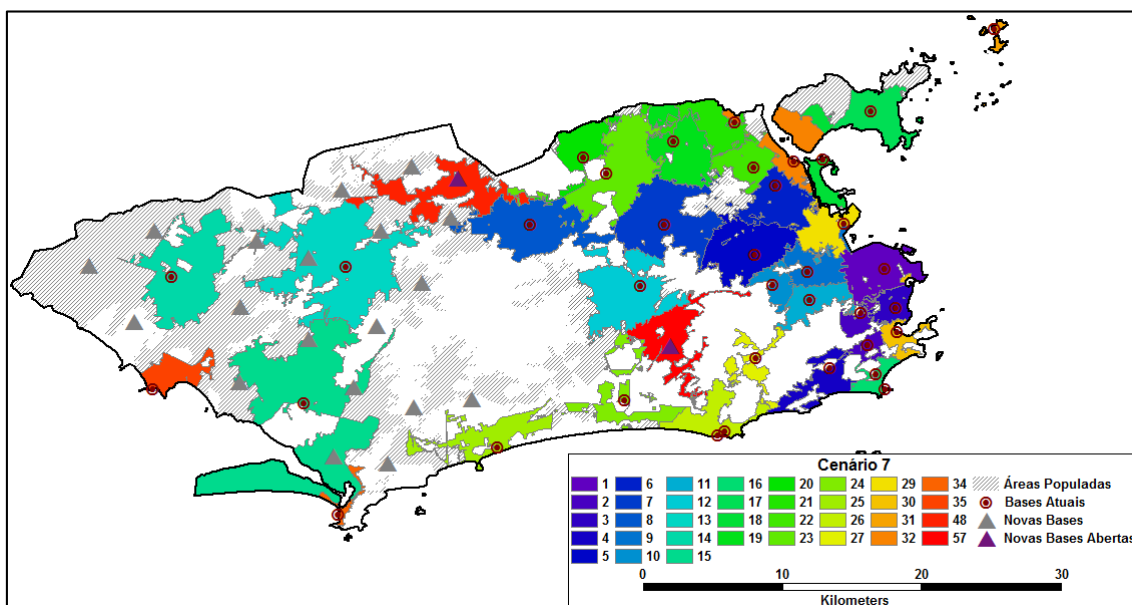


Figura B.1 – Áreas de cobertura das 35 bases utilizadas no Cenário 7

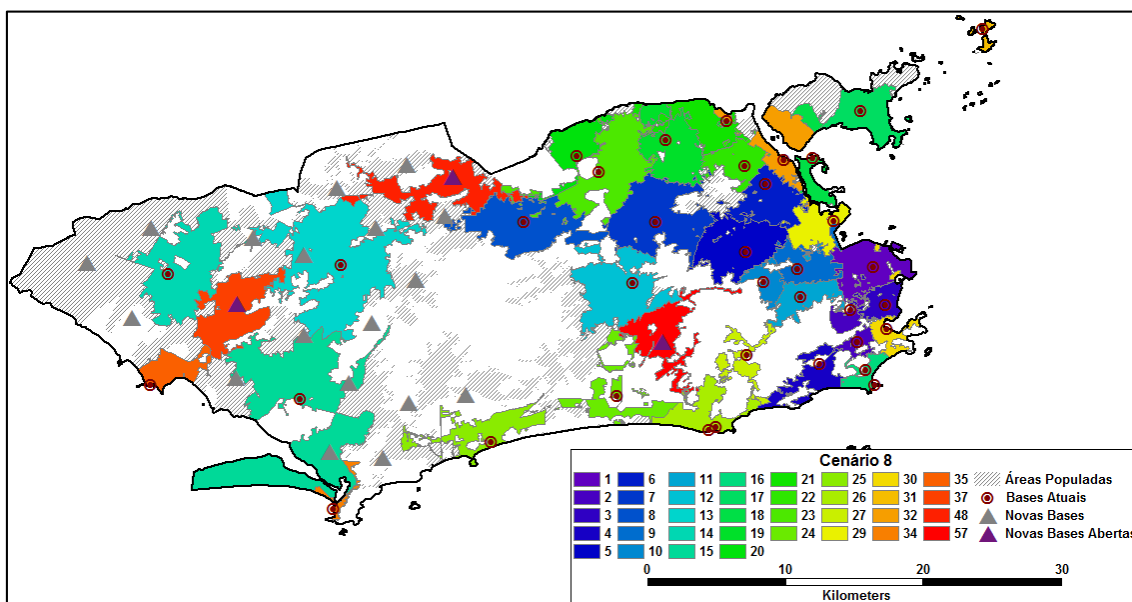


Figura B.2 – Áreas de cobertura das 36 bases utilizadas no Cenário 8

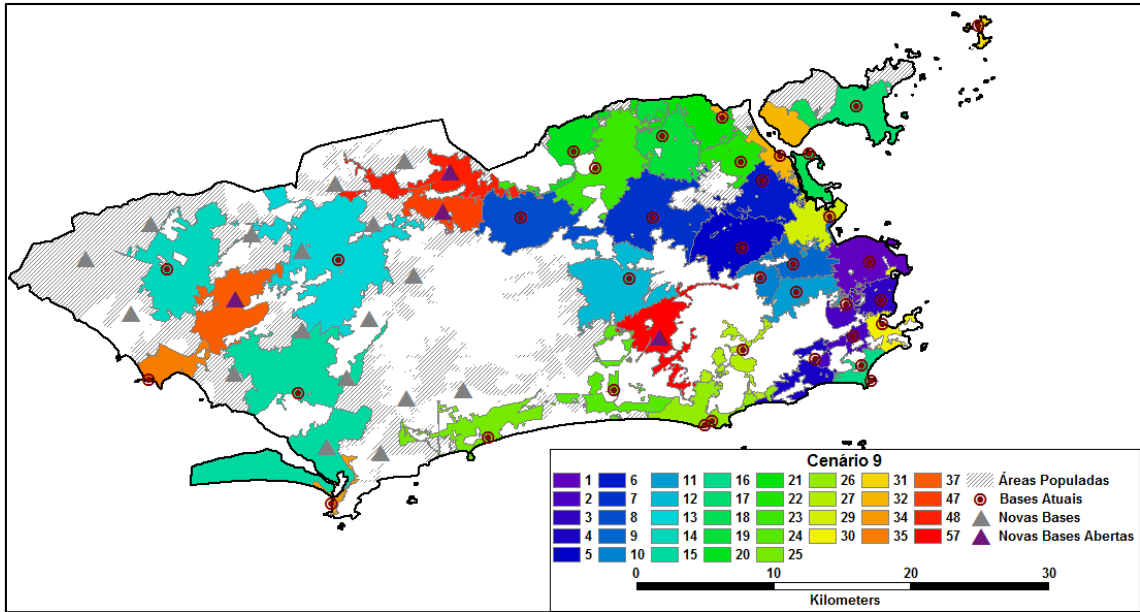


Figura B.3 – Áreas de cobertura das 37 bases utilizadas no Cenário 9

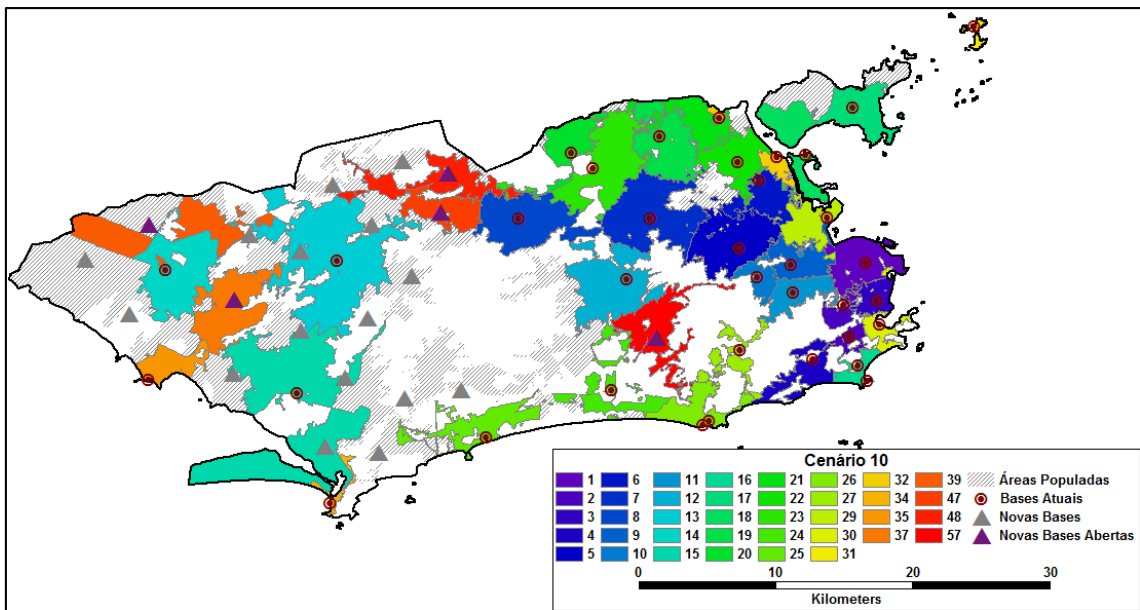


Figura B.4 – Áreas de cobertura das 38 bases utilizadas no Cenário 10

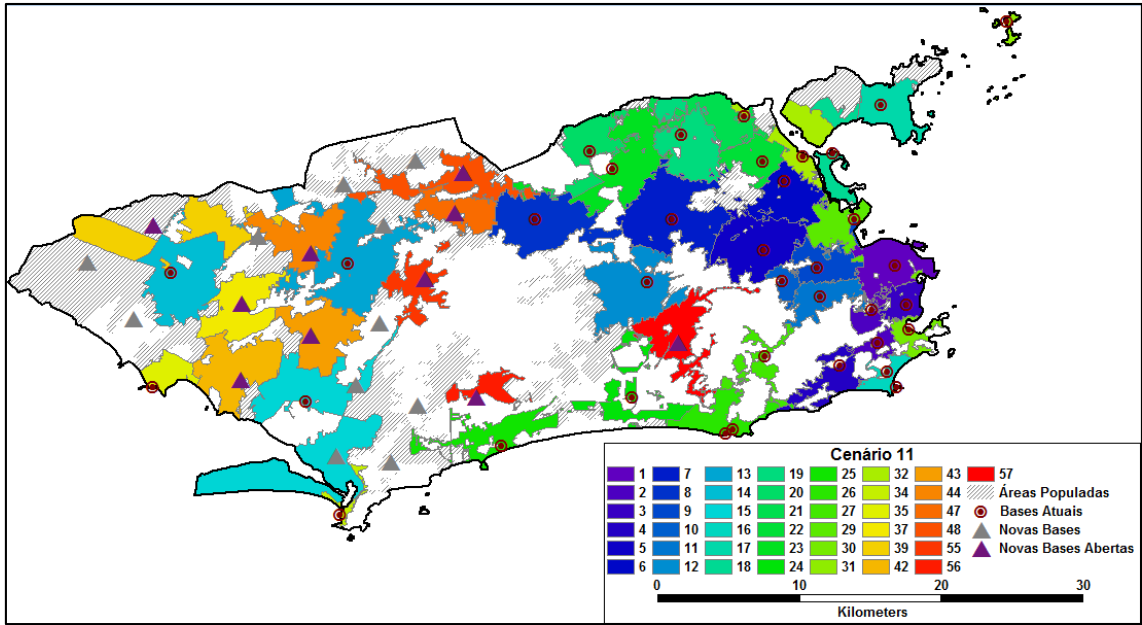


Figura B.5 – Áreas de cobertura das 43 bases utilizadas no Cenário 11

APÊNDICE C – GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO DOS TEMPOS DE RESPOSTA NOS CENÁRIOS DESAGREGADOS POR ÁREA DE PLANEJAMENTO

Os gráficos de comparação dos tempos de resposta médio, mínimo e máximo dos cenários, desagregados por área de planejamento podem ser visualizados nas Figuras C.1, C.2 e C.3, respectivamente.

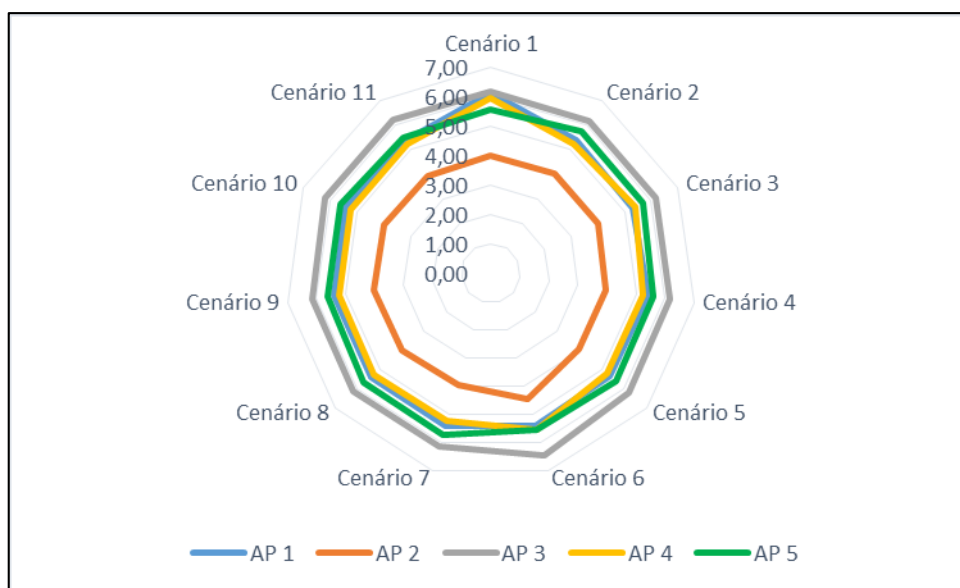


Figura C.1 – Tempo médio de resposta das bases nos cenários por AP

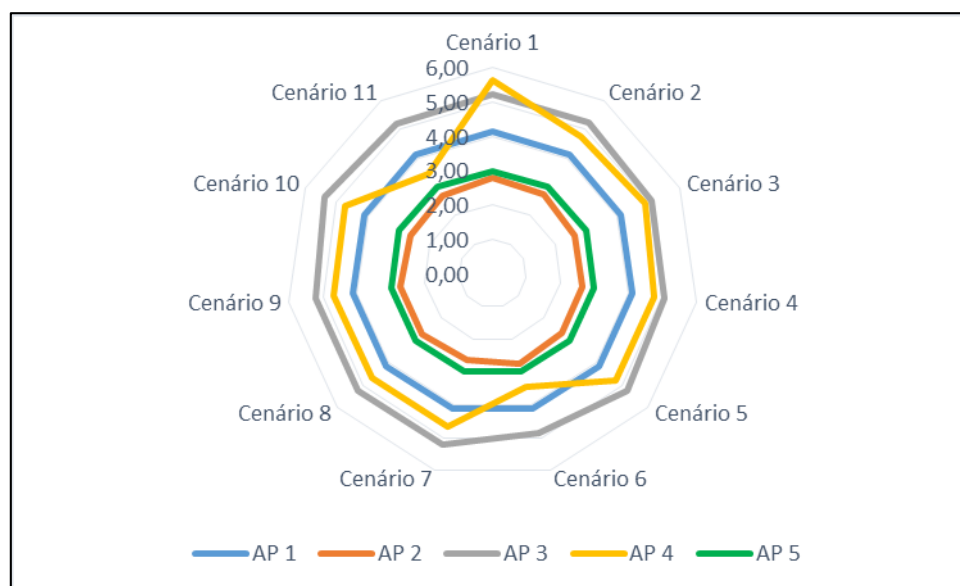


Figura C.2 – Tempo mínimo de resposta das bases nos cenários, por AP

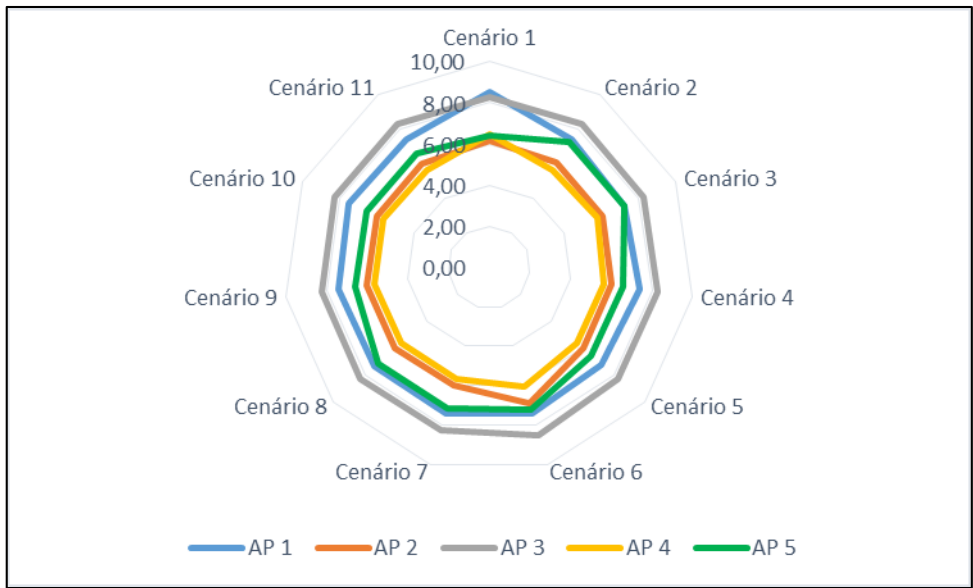


Figura C.3 – Tempo máximo de resposta das bases nos cenários, por AP