

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

VALTANIA FERREIRA DA SILVA

PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE VIATURAS POLICIAIS: ESTUDO DE CASO NA CIDADE
DE JOÃO PESSOA-PB

Orientador: Prof. Dr. Lucídio dos Anjos Formiga Cabral

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Quirino do Nascimento

João Pessoa
2014

VALTANIA FERREIRA DA SILVA

**PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE VIATURAS POLICIAIS: ESTUDO DE CASO NA
CIDADE DE JOÃO PESSOA-PB**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção. Área de concentração: Gestão da Produção. Subárea: Pesquisa Operacional

Orientador:

Prof. Dr. Lucídio dos Anjos Formiga Cabral

Coorientador:

Prof. Dr. Roberto Quirino do Nascimento

João Pessoa
2014

S586p *Silva, Valtania Ferreira da.*
 Problema de alocação de viaturas policiais:
 estudo de caso na cidade de João Pessoa-PB /
 Valtania Ferreira da Silva.- João Pessoa, 2014.
 127f.
 Orientador: Lucídio dos Anjos Formiga Cabral
 Coorientador: Roberto Quirino do Nascimento
 Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT
 1. *Segurança militar.* 2. *Viaturas policiais -*
 localização - posicionamento. 3. *Hotspot.* 4. *P-*
 medianas. 5. *K-means.* 6. *Meta-heurísticas*
 7. *WebGIS.*

VALTANIA FERREIRA DA SILVA

**PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE VIATURAS POLICIAIS: ESTUDO DE CASO NA
CIDADE DE JOÃO PESSOA-PB**

Esta Dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal da Paraíba.

João Pessoa (PB), 24 de fevereiro de 2014.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Lucídio dos Anjos Formiga Cabral
Orientador

Prof. Dr. Roberto Quirino do Nascimento
Coorientador

Prof. Dr. Dario José Aloise
Avaliador Externo

Prof. Dr. Anand Subramanian
Avaliador Interno

À minha família pelos princípios morais, incentivo, amor e acima de tudo por acreditar e torcer pelo meu sucesso.

Ao meu amor Fernando pelo apoio, companheirismo, paciência, cumplicidade, compreensão e elogios.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, Arquiteto de todo o nosso projeto de vida, por todo amor, presença constante e sabedoria .

Aos professores Lucídio e Roberto Quirino, meu especial agradecimento, porque me acolheram com muito profissionalismo, amizade e ensinamentos. Sempre dispostos a contribuir com o meu aprendizado e crescimento, me impulsionavam para o melhor caminho como mestres que dizem aos discípulos: "Vá, você consegue, acreditamos em você". Aos dois mestres e amigos, não tenho palavras para externar a minha sincera gratidão. Muito obrigada!

Aos gurus Gilberto e Teobaldo, pelas ricas contribuições sem as quais não teria alcançado os objetivos desta pesquisa. Agradeço também pela amizade, apoio e por todas as gargalhadas que desfrutei no LAPORTE. Sem contar Giba, com a certeza, que também iremos ser milionários igual ao nosso grande Teo Júnior.

Aos amigos Walton e Raphael do meu grupo de Pesquisa Operacional, com os quais aprendi e me diverti muito. Valeu muito! Minha gratidão pela amizade, paciência, ajuda e companheirismo.

À minha amiga Wanessa pela força, apoio e por ter me apontado novos horizontes para realização de um sonho.

Aos amigos e amigas que compõem a turma do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - 2012 - UFPB (PPGEP-2012). Foi muito bom ter desfrutado a companhia de vocês em momentos diversos, ficará a saudade. Saibam que todos são muito especial para mim.

A todos os professores da turma do PPGEP-2012 - UFPB. Muito grata a todos pelos ensinamentos.

À nossa querida e competentíssima coordenadora do PPGEP, a professora Silene, assim como o professor Bueno, externo meus agradecimentos por alimentar sonhos com postura austera e desempenhar um trabalho maravilhoso para enaltecer o conceito do PPGEP.

Aos amigos da Secretaria do PPGEP que tanto me apoiavam e me ajudavam: nossa querida Ana, o nosso querido Nildo e o nosso estimado Ricardo. Muito obrigada a vocês por tudo.

Aos componentes da banca examinadora, os professores Anand e Dario. Muito grata, pelas observações e sugestões valiosas para serem incrementadas na pesquisa.

Aos meus colaboradores diretos - soldado SAV Widmard e a funcionária civil Maria José, pela ajuda e apoio constante durante toda a minha ausência. Meu muito obrigada.

Aos meus amigos Lisieux, João, Guga, Luciano que com carinho, sempre me motivavam proporcionando momentos alegres e descontraídos. Enfim, a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para conclusão desta pesquisa.

RESUMO

Localizar serviços públicos emergenciais se enquadra em um dos problemas clássicos de otimização onde pontos candidatos são disponibilizados para que sejam escolhidos, dentre eles, aqueles que otimizem o critério de eficiência estabelecido, visando localizar um número limitado de facilidades. O conjunto de locais candidatos tem grande influência sobre a solução final gerada por um modelo de localização. Na pesquisa, foram definidas três estratégias para eleger os locais candidatos ao posicionamento de viaturas policiais: decisão do gestor de segurança, modelo de P -medianas e método de clusterização k -means. Com apoio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) foi possível georreferenciar as ocorrências de crimes, visualizar a distribuição dos locais candidatos selecionados e identificar a presença de *hotspots* de crimes. Visando resolver o problema de alocação de viaturas adotou-se duas abordagens: exata e heurística. Para tanto, duas meta-heurísticas híbridas foram implementadas - GRASP combinado com VND e GRASP com modelo exato, as quais obtiveram soluções iguais ou muito aproximadas da solução ótima. Foi desenvolvido um sistema de apoio a decisão espacial baseado na solução da formulação do problema de localização de facilidades com restrições de cobertura e cobertura *backup*. Trata-se de uma ferramenta WEB construída com base os padrões usados pela tecnologia WebGIS.

Palavras-chave: Localização de viaturas policiais, *hotspot*, p -medianas, k -means, meta-heurísticas híbridas, WebGIS

ABSTRACT

Find emergency public services falls into one of the classic optimization problems where points are available for candidates who are chosen, among them, those that optimize the efficiency criteria established, to find a limited number of facilities. The set of candidate sites have great influence on the final solution generated by a model location . In the research, three strategies were used to elect local candidates to position the cars of police : decision of the Security Manager , p-median model and method of clustering k-means. With the support of Geographical Information Systems (GIS) it was possible to georeference the occurrences of crimes , to visualize the distribution of selected local candidates and identify the presence of hotspots of crime. Aiming to solve the problem of allocating vehicles adopted two approaches : exact and heuristic . Therefore, two hybrid meta - heuristics were implemented - GRASP combined with VND and GRASP with exact model. They obtained same or very approximate solutions of the optimal solution . It was developed a system of spatial decision support based on the solution of the formulation of the problem of locating facilities with restricted coverage and backup coverage. It is a Web tool built with by WebGIS technology.

Keywords: Location of police cars, hotspot, p-median, k-means, hybrid meta-heuristics, WebGIS

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Questões e componentes de um modelo de localização.....	10
Figura 2.2- Modelos de localização de facilidades	13
Figura 2.3- Exemplos de objetivos de problemas	15
Figura 2.4- Exemplos de p -medianas.....	18
Figura 2.5- Definição de Geoprocessamento	24
Figura 2.6- Integração de dados no SIG	25
Figura 2.7- Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica	25
Figura 2.8- Funções de um SIG para planejamento de facilidades.....	27
Figura 2.9- Identificação de <i>clusters</i>	27
Figura 2.10- Passos do algoritmo do método <i>k-means</i>	32
Figura 2.11- Linha do tempo da WebGIS.....	33
Figura 2.12- Arquitetura básica do arquitetura WebGIS	33
Figura 2.13- Espaço de busca	36
Figura 2.14- Algoritmo GRASP proposto	40
Figura 2.15- Algoritmo da fase de construção do GRASP.....	40
Figura 2.16 - Algoritmo da fase de Busca local do GRASP	41
Figura 3.1 - Divisão Operacional de João Pessoa em APP.....	43
Figura 3.2 - Subunidades Operacionais	44
Figura 3.3 - Setores da 1ª Cia/1ºBPM.....	45
Figura 3.4 - Setores da 1ª Cia/5ºBPM.....	45
Figura 3.5- Distribuição espacial de viaturas durante um dia.....	46
Figura 3.6- Distribuição espacial de viaturas durante a noite	46
Figura 3.7- Estrutura operacional do CIOP	47
Figura 3.8 - Atendimento de chamadas e despachos de viaturas no CIOP.....	47
Figura 3.9 - Tela para cadastro de ocorrências no CIOP	48
Figura 3.10-Tela para despacho de viaturas e acompanhamento de ocorrências no CIOP	48
Figura 4.1 - Distribuição espacial da jurisdição da Polícia de Dalas	53
Figura 4.2 - Setores, <i>beats</i> e incidentes da Divisão Central Norte.....	54
Figura 4.3 - Menores distâncias da rede e construção do conjunto N_i	54
Figura 4.4 - Setores e rotas ótimas para incidentes.....	55
Figura 5.1 - Etapas adotadas na pesquisa.....	60
Figura 5.2 - Distribuição espacial de Crimes Contra o Patrimônio	61
Figura 5.3 - Mapa de <i>Kernel</i> com <i>Hotspots</i>	61

Figura 5.4 - Mapa de Distribuição dos Pontos de Visibilidade Operacional - POVO.....	63
Figura 5.5 - Distribuição espacial de Viaturas do POVO e Ocorrências.....	63
Figura 5.6 - Mapa de 26-medianas geradas no SPRING	64
Figura 5.7 - Distribuição espacial de 26 <i>clusters</i> e respectivos centróides.....	65
Figura 5.8 - Distribuição do conjunto de pontos candidatos selecionados	66
Figura 5.9 - Distribuição de pontos candidatos, enfatizando o Centro	67
Figura 5.10 - Exemplo de sobrecarga de uma viatura.....	71
Figura 5.11 - Pseudocódigo da Meta-heurística GRASP+VND.....	74
Figura 5.12 - Algoritmo da heurística VND na busca local.....	76
Figura 5.13 - Meta-heurística GRASP + MétodoExato.....	77
Figura 5.14 - Algoritmo Meta-heurística GRASP + ModeloDeAlocaçãoDeViaturas.....	77
Figura 6.1 - Resultados obtidos com a instância de 3282 registros	81
Figura 6.2 - Resultados obtidos com a instância de 4129 registros	82
Figura 6.3 - Resultados obtidos com a instância de 10.058 registros	83
Figura 6.4 - Melhor tempo	84
Figura 6.5 - Pior tempo de execução.....	85
Figura 6.6 - Distribuição espacial de 3282 ocorrências em 10 setores	85
Figura 6.7- Solução do método exato	85
Figura 6.8- Solução do método GRASP+ModeloExato	85
Figura 6.9- Solução do método GRASP+VND	85
Figura 6.10- Solução do método Exato no mapa de João Pessoa	86
Figura 6.11- Solução do método Exato.....	86
Figura 6.12 - Solução do método GRASP+VND	86
Figura 6.13 - Solução GRASP+ModeloExato	86
Figura 7.1 - Arquitetura da Ferramenta Web proposta	89
Figura 7.2 - Tela de autenticação do usuário	90
Figura 7.3 - Mapa do Centro e Varadouro	90
Figura 7.4 - Tela de otimização	91
Figura 7.5 - Solução ótima para 2 viaturas e cobertura igual a 2 minutos.....	91
Figura 7.6 - Solução ótima para 4 viaturas e cobertura igual a 3 minutos.....	92
Figura 7.7 - Solução ótima para 5 viaturas e cobertura igual a 5 minutos.....	93

SUMÁRIO

1 Introdução	001
1.1 Tema da pesquisa	001
1.2 Problemática e delimitação do tema	002
1.3 Justificativa do tema de pesquisa	004
1.4 Objetivos (gerais e específicos)	005
2 Fundamentação teórica	007
2.1 Problemas de Localização.....	007
2.1.1 Histórico.....	007
2.2 Modelagem Matemática.....	009
2.3 Modelos de Localização de Facilidades.....	010
2.3.1 Classificação dos modelos de localização	012
2.3.2 Modelos de localização de facilidades e objetivos	013
2.3.3 Modelos determinísticos de localização	016
2.3.3.1 Problemas de p -medianas.....	016
2.3.3.2 Problema de Cobertura de Conjunto	019
2.3.3.3 Problema de Localização de Máxima Cobertura	020
2.3.4 Modelos para localização de serviços emergenciais	021
2.4 Modelos matemáticos e Geoprocessamento	023
2.4.1 Sistema de Informação Geográfica (SIG).....	024
2.4.1.1 SIG e Modelos de localização.....	026
2.4.1.2 Integração de SIG e problemas de p -medianas	028
2.4.1.3 SPRING e Interpolador de Intensidade <i>kernel</i>	029
2.4.2 Tecnologia WebGIS.....	032
2.5 Meta-heurísticas e Heurísticas	034
2.5.1 Heurísticas	034
2.5.1.1 Heurísticas construtivas	035
2.5.1.2 Heurística de Refinamento ou Busca Local	035
2.5.2 Espaço de solução	035
2.5.3 Noções de Vizinhança.....	036
2.5.4 Meta-heurísticas	037
2.5.5 GRASP.....	038
2.5.5.1 Fase de construção	038
2.5.5.2 Fase de busca local.....	039

2.5.5.3 Algoritmo GRASP	039
2.5.5.3.1 Algoritmo de construção de uma solução	040
2.5.5.3.2 Algoritmo de busca local	041
3 Atuação operacional da Polícia Militar em João Pessoa-PB	043
3.1 Divisão de áreas operacionais	044
3.2 Setores Operacionais	045
3.3 Operacionalização do serviço de atendimento de ocorrências.....	047
4 Modelo de Cobertura para Área de Patrulhas Policiais (PPAC).....	049
4.1 Formulação matemática do PPAC	049
4.2 Operacionalização do Modelo PPAC	052
4.3 Modelo de Cobertura <i>backup</i>	057
4.4 Tratando <i>tradeoff</i>	058
4.5 Capacitação do modelo PPAC	058
5 Materiais e Métodos.....	060
5.1 Registro das ocorrências	060
5.1.1 Identificação de <i>hotspots</i>	061
5.2 Seleção de Locais Candidatos.....	062
5.2.1 Decisão do gestor de alto escalão	063
5.2.2 Modelo de <i>p</i> -medianas	064
5.2.3 Uso da técnica de agrupamento <i>k-means</i>	065
5.2.4 Locais candidatos	066
5.3 Modelo de alocação de viaturas policiais	067
5.3.1 Abordagem exata	068
5.3.1.1 Modelagem matemática	069
5.3.1.2 Problema de alocação de viaturas com penalidade por sobrecarga ...	071
5.3.1.3 Modelagem matemática com penalidade por sobrecarga	073
5.3.2 Abordagem heurística	073
5.3.2.1 Meta-heurística GRASP+VND.....	074
5.3.2.1.1 Busca local com base na heurística VND	075
5.3.2.2 Meta-heurística híbrida: GRASP+MétodoExato	076
6 Resultados computacionais	079
6.1 Instâncias.....	079
6.2 Determinação do parâmetro para construção da solução no GRASP	079
6.3 Metodologia de testes	079
6.4 Resultados obtidos	080

6.4.1 Resultados com a instância de 3298	081
6.4.2 Resultados com a instância de 4129 registros.....	082
6.4.3 Resultados com a instância de 10.058 registros.....	083
6.4.4 Tempos computacionais das abordagens	083
6.4.4.1 Melhor tempo	083
6.4.4.2 Pior tempo	084
6.4.5 Distribuição espacial de soluções obtidas	084
6.4.5.1 - Solução para a instância de 3282 pontos	085
6.4.5.2 - Solução para a instância de 4129 ocorrências	086
7 Sistema de apoio a decisão espacial.....	088
7.1 Ferramenta Web para o posicionamento de viaturas policiais.....	088
7.1.1. <i>Facility Location Service</i>	089
7.2 Serviço de otimização de posicionamento de viaturas.....	090
7.2.1 Cenário 1	091
7.2.2 Cenário 2	092
7.2.3 Cenário 3	093
8 Conclusão.....	094
9 Referências Bibliográficas	097
10 Anexo	104
10.1 Artigo aceito no Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO) - 2013	104

1 INTRODUÇÃO

Tomar decisões é uma rotina, no dia a dia, de vários profissionais, tais como: gestores, governantes e empreendedores. Para tanto, durante o processo decisório é necessário que sejam apresentadas várias alternativas para que a decisão mais adequada seja tomada. Porém, devido às incertezas futuras, nada garante que a solução escolhida tenha sido a melhor. Deste modo, verifica-se que qualquer problema de decisão requer um julgamento sobre um conjunto conhecido de estratégias alternativas, representadas por uma lista, tão completa quanto possível de todas as soluções apresentadas para resolver o problema. A tomada de decisão deve ser, por conseguinte, na direção da melhor opção para apresentar um resultado satisfatório, conforme objetivo almejado.

Um empresário que pretende expandir o negócio, assim como um gestor de segurança pública que precisa disponibilizar recursos operacionais para inibir ou reduzir a criminalidade, enveredam em um processo decisório, conforme critérios específicos e norteadores, para escolher o melhor local para instalar o bem ou serviço. O primeiro profissional almeja lucro, enquanto o segundo, devido à natureza do serviço, busca a satisfação do cidadão. A tomada de decisão locacional diz respeito à decisão de escolher um local para posicionar uma ou mais unidades produtivas. Neste sentido, localizar um novo supermercado, hospital ou viaturas de polícia, por exemplo, se enquadra numa classe de problemas intitulados problemas de localização que consistem em selecionar uma posição geográfica de maneira que seja otimizada uma medida de utilidade, obedecendo diversas restrições, para possibilitar a operação do sistema produtivo.

A teoria da localização tem sido empregada para resolver problemas tanto nos setores privados como públicos. Nos serviços públicos emergenciais, tais como segurança pública, defesa civil e serviços médicos, possuem em comum o objetivo de atender a população em um menor espaço de tempo possível, já que visam salvar vidas e coibir crimes. Sendo assim, o posicionamento dos recursos emergenciais em locais estratégicos é muito importante para um atendimento ágil à sociedade.

1.1 Tema da pesquisa

Um dos problemas clássicos de otimização é onde situar bens ou serviços, de modo que atendam a demanda, com algum critério de eficiência, como distância ou tempo de resposta. Localizar serviços públicos emergenciais se enquadra nesse tipo de problemas que na literatura é conhecido como localização de facilidades (*facility location*). Neste problemas, diversos pontos candidatos são disponibilizados para que sejam escolhidos, dentre eles, aqueles que otimizem o critério de eficiência estabelecido. Eleger antecipadamente os possíveis locais candidatos para

posicionar facilidades é fundamental durante o planejamento para evitar insucesso, prejuízo ou insatisfação de clientes.

Verifica-se, então, que a tomada de decisão locacional diz respeito à decisão de escolher um local para a instalação de uma ou mais unidades produtivas, na busca de atender a demanda ou outros critérios previamente definidos. Desta maneira, posicionar viaturas policiais em pontos estratégicos, eleitos previamente, para minimizar o tempo de deslocamento, faz parte de problemas de localização cuja solução pode auxiliar gestores de segurança pública no combate a criminalidade e melhorar a qualidade dos serviços prestados.

A teoria da localização tem sido empregada para resolver problemas em várias áreas do conhecimento. O emprego da teoria da localização é visto em trabalhos apresentados pelos pesquisadores: Sene (2001), Drezner (2002), Paluzzi (2004), Caccetta (2005), ReVelle (2005), Arroyo, (2006), Dukke (2006), Lima Júnior (2006), Araz et al (2007), Ribeiro (2008), Curtin (2010), Correia, (2011), Zarandi (2011), Bandyopadhyay (2012). Sene (2001) ainda cita dois principais grupos de pesquisa e divulgação de implementações de problemas ligados a teoria da localização, como sendo: *EURO Working Group on Locational Analysis* e *SOLA – INFORMS Section on Location Analysis*, cujos endereços eletrônicos são, respectivamente, (<http://www.vub.ac.be/EWGLA/homepage.htm>) e (<http://www.ualberta.ca/~sola>).

Cita-se também como exemplos de aplicações implementadas: localização de centros de saúde em áreas rurais (BENNETT, 1982); localização de ambulâncias para atendimento de emergência em São Domingo-República Dominicana (EATON, 1986); localização de sirenes de aviso para casos de emergência (CURRENT, 1992), dentre outras.

1.2 Problemática e delimitação do tema

De modo geral, a operacionalização dos serviços públicos emergenciais consiste na disponibilização em pontos fixos, de veículos (recursos limitados), os quais ficam subordinados a uma Central de Despacho para serem acionados, mediante uma solicitação da comunidade. Neste sentido, a eficiência e eficácia do serviço emergencial gira em torno do melhor posicionamento de veículos (viaturas), visando diminuir o tempo de resposta.

Na literatura, é escasso o número encontrado de aplicações voltadas para a determinação dos melhores locais para lançar viaturas de polícia com a finalidade de diminuir o tempo de resposta, a partir de uma distribuição espacial eficiente dessas unidades móveis. No entanto, Curtin (2010) testa um modelo matemático proposto, na jurisdição da Polícia de Dallas, no Texas, Estados Unidos. Sher (2008) apresenta uma pesquisa cujo objetivo é alocar veículos de patrulhas policiais de forma a maximizar a cobertura em estradas interurbanas, no Norte de Israel. Por outro lado, o estudo de Bammi (2003) visa designar patrulhas de polícia para ocupar localizações ótimas,

com o propósito de minimizar o tempo de resposta, em Aurora, no estado de Illinois, Estados Unidos. A pesquisa de Gurgel (2010) enfatiza a localização de unidades policiais pertencentes a Polícia Militar do Estado de Rio Grande do Norte em pontos estratégicos da cidade de Natal para redução de custos de operações e tempo de resposta de ocorrências policiais.

Nesta pesquisa, será abordado o problema de posicionamento de viaturas do radiopatrulhamento (R/P) da Polícia Militar as quais são acionadas pelo Centro Integrado de Operações Policiais (CIOP) para atender ocorrências emergenciais, na cidade de João Pessoa-PB.

O Centro Integrado de Operações Policiais (CIOP), órgão da Secretaria da Segurança Pública que funciona diuturnamente, é responsável pelo atendimento, através do serviço público 190, das solicitações oriundas da comunidade que mora ou se encontra em João Pessoa e cidades da região metropolitana da capital paraibana. Tão logo uma ocorrência seja registrada pela telefonista no sistema de cadastro e despacho de viaturas, o CIOP tem como papel precípua acionar uma viatura policial para se deslocar até o local do incidente, buscando averiguar a veracidade dos fatos e, em caso afirmativo, adotar medidas cabíveis.

Atualmente, as viaturas operacionais são lançadas diariamente nos respectivos setores (áreas geográficas correspondentes a um ou mais bairros), sem obedecer critérios técnicos, apenas em cumprimento a uma escala previamente elaborada pela Unidade Policial a que pertence. Desta maneira, em virtude do número insuficiente de viaturas operacionais para realizar policiamento preventivo e ostensivo, a maioria dos setores é coberto por apenas um desses veículos oficiais. A falta de viaturas para atender de imediato ao solicitante contribui para aumentar o número de ocorrências emergenciais pendentes no CIOP. Assim, vai se formando uma fila de ocorrências que dependem da disponibilidade de uma viatura, quer seja aquela do setor, ou outra que esteja próxima do local, porém desempenhada. Como consequência, o tempo de atendimento (TA) vai aumentando, o que provoca insatisfação no solicitante devido a força policial não chegar no local da incidência em tempo aceitável. Muitas vezes, a demora no atendimento emergencial faz com que o cidadão desista de esperar pelo apoio policial, deixando a localidade antes da chegada da viatura.

Vislumbra-se, pois, a necessidade de um sistema de apoio a decisão espacial que possa auxiliar os gestores de segurança, no tocante à alocação de viaturas para atender o maior número de pessoas, num menor tempo possível, levando em consideração a escassez de unidades móveis. Neste sentido, esta pesquisa guiará rumo ao estudo de um sistema de apoio a tomada de decisão espacial para posicionamento estratégico de viaturas policiais, visando minimizar o tempo de deslocamento para chegar ao local do incidente.

Deste modo, diante deste contexto de deficiência, surge a questão-problema: Como a Polícia Militar, de forma eficaz e eficiente, poderá situar as viaturas operacionais destinadas ao serviço de radiopatrulhamento para reduzir o tempo de atendimento (TA) em ocorrências emergenciais ?

1. 3 Justificativa do tema de pesquisa

Relatos de violência são datados desde os primórdios da existência humana, ganhando proporções com o crescimento das populações. Esse grave fenômeno social tem causado danos físicos, psicológicos e sociais, assim como tem culminado na morte de muitas pessoas. O contínuo incremento da violência cotidiana, configura-se como aspecto representativo e problemático da atual organização da vida social, especialmente nas metrópoles (WAISELFISZ, 2010). Na mesma velocidade em que a sociedade evolui, a criminalidade avança sobre todos os segmentos e camadas sociais. Em contrapartida, as ações de prevenção e de combate ao crime não estão seguindo no mesmo ritmo.

Muito se tem discutido sobre Segurança Pública no mundo, em buscas de soluções para o enfrentamento à violência e à criminalidade. Bottoms (1974) aponta que aplicações da Pesquisa Operacional foram encorajadas pelo Presidente da Comissão de Crimes, no ano de 1967, nos Departamentos de Polícia de Chicago e Washington (EUA) para prevenção da criminalidade, redução de tempo de resposta e alocação de patrulhas policiais para prevenção de crimes. Bammi (1975) apresenta um modelo preditivo, formulado com base na realidade do Departamento de Polícia de Aurora, no Estado de Illinois (EUA) com o propósito de definir a melhor alocação de patrulhas policiais para diminuir o tempo de resposta. Nessa linha de raciocínio, Curtin (2010) também enfatiza a importância da alocação ótima de viaturas para reduzir o tempo de deslocamento de uma viatura policial cuja pesquisa foi realizada na cidade de Dallas, no Texas-EUA.

Os índices de violência também tem aumentado no Brasil. No ano de 2007, foi criado pelo Ministério da Justiça, o Programa Nacional de Segurança Pública com Cidadania (PRONASCI), a partir da perspectiva de que segurança pública se faz com cidadania, priorizando a prevenção e identificação das causas que levam à violência, sem abrir mão das estratégias de ordenamento social e repressão qualificadas. Na Paraíba, conforme Mapa da Violência 2012 apresentado por Waiselfisz (2012), João Pessoa foi classificada como a terceira capital mais violenta do país. Tal evidência contribui para aumentar a sensação de insegurança da população pessoense, de modo que suscita do Governo do Estado mais ações na área de Segurança Pública, para garantir ao cidadão a paz e o bem estar social.

Dentro desse contexto, surge a Polícia Militar com afã de proteger e defender vidas, como casamata para assegurar direitos e garantias constitucionais ao cidadão, bem como responsável pela preservação da ordem pública e da incolumidade das pessoas e do patrimônio. E assim, alinhada

ao preceito constitucional de que Segurança Pública é um direito de todos, a Polícia Militar do Estado da Paraíba busca aplicar estratégias para prestar um serviço de qualidade a todo cidadão, até mesmo aquele que mora ou se encontra em localidades ou bairros, mais longínquos e carentes, do estado paraibano. Essas estratégias de prevenção, ordenamento social e repressão qualificadas ao crime são traduzidas em modalidades diferentes de policiamento ou serviço, dentre as quais se enquadra o radiopatrulhamento. Esta modalidade de policiamento é composto por viaturas equipadas com rádio de comunicação, através do qual é possível a comunicação operacional com a Central de Operações e outras unidades móveis. A distribuição otimizada dessas viaturas é um dos desafios do gestor de segurança pública, já que a escolha da boa localização desses recursos móveis pode contribuir para a diminuição do tempo dispensado pela força policial para atender uma solicitação da comunidade.

Atualmente, as viaturas operacionais são lançadas diariamente nos respectivos setores, em cumprimento a uma escala previamente elaborada pela Unidade Policial (Batalhão ou Companhia de Polícia Militar) a que pertence. O local específico em que a viatura vai se posicionar, dentro do setor, ainda é um problema. Isto porque a Polícia Militar da Paraíba enfrenta uma dificuldade de não dispor de um sistema computacional que possa sugerir localidades estratégicas para alocar esses recursos operacionais visando atender, no menor tempo possível, às ocorrências emergenciais originárias do tri-dígito 190. O estudo será de relevância para a Polícia Militar da Paraíba, uma vez que irá auxiliar o gestor no tocante a distribuição de viaturas operacionais com critérios técnicos, tendo como consequência a redução do tempo de atendimento das ocorrências emergenciais.

1.4 Objetivos (geral e específicos)

Objetivo geral

Desenvolver um sistema de apoio a decisão espacial baseado na solução de uma formulação do problema de localização de facilidades com restrições de cobertura, para auxiliar no posicionamento otimizado de viaturas operacionais da Polícia Militar, em João Pessoa-PB, visando minimizar o tempo de atendimento a uma ocorrência emergencial.

Objetivos específicos

- Geoespacializar as áreas geográficas de atuação operacional da Polícia Militar, referentes a Unidades, SubUnidades e Setores nos quais as viaturas são lançadas
- Identificar e georreferenciar a demanda, conforme ocorrências registradas no CIOP

- Gerar mapas de intensidade *Kernel* para identificar *hotspots* de crimes
- Selecionar possíveis locais candidatos ao posicionamento de viaturas
- Formular um modelo matemático de localização de facilidades para o problema de posicionamento de viaturas policiais
- Implementar um algoritmo para obter uma solução heurística baseada em procedimentos GRASP e VND
- Implementar um algoritmo para obter uma solução heurística baseada na meta-heurística híbrida GRASP combinada com um modelo exato
- Comparar as soluções obtidas em duas abordagens: exata e heurística
- Implementar uma ferramenta WEB para disponibilizar a solução obtida pelo sistema proposto.

Capítulo 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Problemas de Localização

Localizar diferentes tipos de agricultura, próximo do mercado, com o objetivo de minimizar os custos com o transporte, representa o problema formulado pelo economista espacial Johann Heinrich Von Thunen (1875), o qual deu origem a Teoria da localização. O problema contempla na essência, estudar os fatores que motivam a melhor localização, ou o posicionamento de entidades, como carros, escolas e hospitais, em determinado espaço geográfico para atender uma demanda. O processo de escolher locais para situar uma ou mais facilidades visando cobrir pontos de demanda faz parte dos problemas de localização, os quais tratam de decisões sobre onde localizar espacialmente bens ou serviços, levando em consideração a necessidade de atender um conjunto de clientes, com um nível de serviço satisfatório, de maneira que um certo critério (como custo ou lucro) seja otimizado. (AZZONI, 1982; PUU, 1997; MAPA, 2005; HOMER, 2009 *apud* COSTA, 2010).

Na concepção de Ribeiro (2008), facilidade é uma palavra usada para designar fábricas, depósitos, escolas, viaturas policiais, dentre outras. De acordo com o problema, cada facilidade está associada aos respectivos clientes. Sendo assim, as facilidades: fábricas, depósitos, escolas e viaturas policiais podem estar associadas aos respectivos clientes: depósitos, unidades de vendas, estudantes e cidadão em situação emergencial. Conforme Lorena *et al* (2001), as facilidades podem ser escolhidas de duas maneiras: a primeira, como novos centros ou novos serviços a serem abertos ou oferecidos, e a segunda forma, se baseia na seleção de uma facilidade, dentre um conjunto de centros ou vértices já existentes.

2.1.1 Histórico

A determinação do melhor local para instalação de uma unidade produtiva, comercial ou de prestação de serviços, consiste em uma estratégia utilizada, desde o século XII, quando o matemático Evangelista Torricelli se envolveu nesse tipo de problema para estabelecer as áreas ideais para construção de mercados e hospitais (LIMA JÚNIOR, 2006 *apud* CORREIA, 2011). No entanto, o trabalho realizado pelo economista alemão Alfred Weber (1868-1958), que resultou na publicação do livro intitulado *Über den Standort der Industrien*, no ano de 1909, é que constitui o surgimento da era moderna da teoria da localização industrial e, consequentemente, o marco histórico dos problemas de localização. No estudo da teoria da localização, sob a ótica econômica,

Weber analisou o problema de como posicionar um único armazém e de como minimizar a distância entre este equipamento e os respectivos clientes (DUBKE, 2006). A essência dos estudos do alemão era minimizar os custos de transporte da matéria-prima e os custos até o mercado consumidor para avaliar o melhor local para instalar uma indústria. Ainda sobre o modelo de Weber, Mara (2001) expõe que ele é focado na escolha da localização de um determinado empreendimento, considerando as condições econômicas mais vantajosas de produção e de distribuição.

O uso do problema de localização tornou-se crescente, a partir da década de 60. A publicação de Hakimi, no ano de 1964, atraiu mais adeptos, uma vez que apresentou uma formulação matemática para determinar a localização de postos de serviços em redes e postos policiais em rodovias. No trabalho de Hakimi (1964) foram citados dois teoremas. No primeiro teorema, enfatiza-se que dentre os pontos de uma rede, existe um ponto, no qual a soma ponderada das distâncias mais curtas de todos os vértices a este ponto é mínima. Este ponto também é um dos vértices da rede. Enquanto no segundo, define-se que para o caso de se escolher p pontos centrais (problema conhecido como p -medianas), existirá um conjunto de p pontos (vértices da rede) que minimizará a soma das distâncias ponderadas de todos os vértices mais próximos aos respectivos p pontos da rede.

Outra contribuição para o crescimento de pesquisas e aplicações, inerentes a problemas de localização, foi o avanço da computação e da programação matemática que possibilitou o emprego da modelagem matemática, através da programação inteira/mista, programação dinâmica e programação estocástica, na determinação da localização espacial de facilidades. Com o uso dessas ferramentas, as possibilidades de encontrar uma solução ótima foram ampliadas por meio de métodos que permitem um maior relaxamento das pressuposições envolvidas nos modelos tradicionais (RODRIGUES DE OLIVEIRA, 2005).

Desde então, novas pesquisas foram surgindo. ReVelle e Laporte (1986) modificaram a versão do problema das p -medianas para exemplificar como a mesma versão poderia ser aplicada em contextos de tomada de decisão estratégica. Boffey e Narula (1997) citam: localização de centros de saúde na Colômbia; análise de padrões de assentamentos arqueológicos no México; localização de equipamento para contenção e remoção de manchas de óleo em *Long Island Sound* (Estados Unidos). Em Costa (2010), evidencia-se um estudo para localização de um hospital em Lisboa, Portugal; Localizar patrulhas policiais em estradas no Norte de Israel é uma aplicação verificada em Sher (2010).

2.2 Modelagem Matemática

A Matemática é uma ciência que tem a capacidade de descrever fenômenos naturais observados, processos e sistemas através de leis e equações matemáticas as quais dão origem ao modelo matemático. Um modelo é uma representação simplificada da realidade, de maneira que as principais características de um objeto do mundo real sejam observadas. Consiste de uma construção artificial, na qual objetos do mundo real são capturados e representados matematicamente, em equações e em computador. Modelagem de dados refere-se ao processo de abstrair fenômenos, entidades de interesse, variáveis e regras associadas, para construção do modelo matemático. De acordo com ReVelle (2005), o processo de análise de localização tem a seguinte sequência lógica: modelagem, formulação matemática e a solução do problema de localização de facilidades, em um dado espaço geográfico. Neste sentido, Martins (2005) orienta que uma vez existindo a necessidade de decidir sobre onde localizar espacialmente facilidade(s), o gestor na fase de análise deve levar em consideração: o objetivo precípua da Empresa, conhecer o quantitativo dos recursos materiais e humanos existentes que poderão ser empregados, definir as estratégias para seguir em busca da seleção de locais candidatos, escolher e avaliar alternativas de localização e por fim, como decisão final, selecionar o local específico.

Fazem uso dos modelos matemáticos: a Pesquisa Operacional, juntamente com a programação matemática, já que tratam de problemas de decisão, conforme Arenales (2007). Na visão de Winston (2004), Pesquisa Operacional significa "abordagem científica para tomadas de decisões que busca determinar como melhor projetar e operar um sistema, usualmente sob condições que requerem a alocação de recursos escassos".

Desse modo, ReVelle (2005) evidencia que problemas de localização de facilidades pertencem a uma relevante classe de problemas de Pesquisa Operacional, geralmente, identificados pela presença de quatro componentes a saber:

- 1 - Existência de clientes (demanda) a serem alocados a respectiva facilidade, a qual se presume que está posicionada em pontos ou em vias.
- 2 - Facilidades para serem localizadas
- 3 - Definição do espaço geográfico, no qual clientes e facilidades estarão situados.
- 4 - Uma métrica (valor, medida) que indica a distância ou tempo máximo (padrão, crítico), que deve existir, entre clientes e facilidades.

Por sua vez, de forma genérica, Gonçalves (2007) na Figura 2.1 apresenta os componentes e perguntas que devem enriquecer o processo de modelagem para um problema de localização.

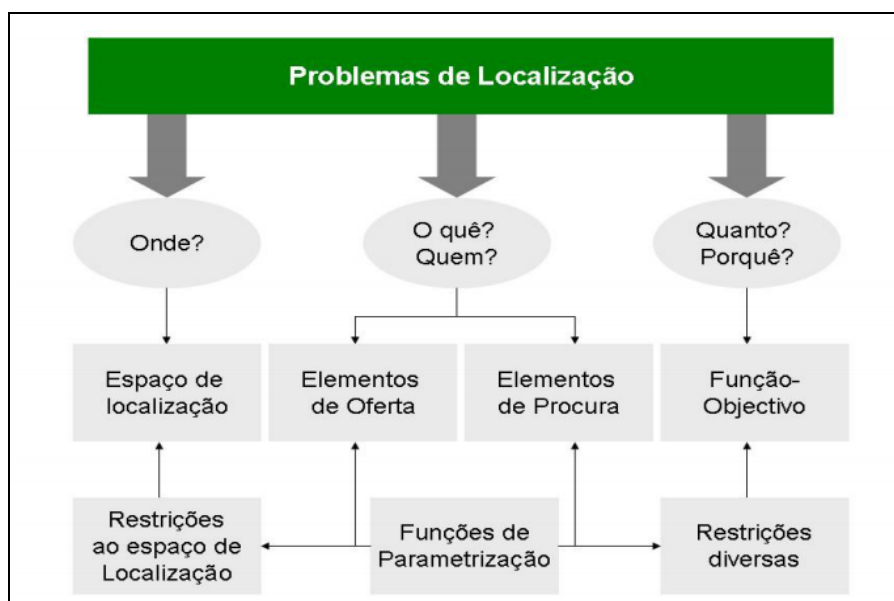


Figura 2.1 Questões e componentes de um modelo de localização
Fonte: Baseado em Gonçalves (2007:13 *apud* Costa, 2010)

Verifica-se na Figura 2.1 que espaço de localização, demanda, oferta, quantidade de recursos e restrições das variáveis são componentes os quais, após serem definidos, permitem responder perguntas do tipo: Em que locais (onde) poderão ser posicionados os bens ou serviços oferecidos? Quantas facilidades deverão ser localizadas? Qual demanda beneficiada? Quais das localizações, constituem a melhor solução? Como se deve associar cada ponto de demanda a respectiva facilidade? Para tanto, com a função objetivo será possível elaborar a avaliação e validação das soluções (DASKIN, 1995; COSTA, 2010).

2.3 Modelos de Localização de Facilidades

Os modelos de localização de facilidades têm como objetivo localizar bens ou serviços de forma otimizada. O melhor local é selecionado, dentre um conjunto de locais candidatos, para atender clientes, com base no critério adotado, a exemplo de: minimizar distâncias/tempo ou maximizar a demanda (LORENA, 2001; MAPA, 2006; FIGUEIREDO, 2007; COSTA 2010). De uma maneira mais geral, todo modelo de localização de facilidades deve resultar em soluções que contenham posições de locais distribuídas em um espaço geográfico nas quais facilidades poderão ser situados para atender a demanda (SMITH *et al*, 2007; GONÇALVES, 2007 *apud* COSTA, 2010).

Pelo fato de ainda possibilitar alocar os pontos de demanda a pontos de facilidades, esses modelos são também conhecidos como problemas de localização-alocação. Como o próprio nome sugere, possibilita simultaneamente a localização da facilidade e a alocação da demanda às respectivas demandas. A dependência do problema de localização-alocação com a demanda é apontada como a principal diferença entre o problema de localização-alocação e o problema de localização (LORENA, 2001; COSTA, 2010). Deste modo, um fator importante que deve motivar a implementação de um modelo de localização-alocação é a suposição de que o modelo proposto irá melhorar a eficiência e o nível do serviço prestado (DASKIN, 1995).

O problema de localização de facilidades está enquadrado na categoria de Problemas de Otimização Combinatória ou Discreta nos quais as variáveis assumem valores inteiros ou discretos. Em Problemas de Otimização, busca-se encontrar a melhor combinação, dentre um conjunto de variáveis, para maximizar ou minimizar uma função geralmente chamada de função objetivo ou função custo. Uma vez que pertence a categoria de problemas de otimização combinatória, o problema de localização de facilidades faz parte da classe de problemas NP-Difícil - quando não existem algoritmos para resolver o problema em tempo computacional polinomial. Devido à natureza combinatória do problema, o número de soluções cresce exponencialmente à medida que cresce a dimensão do problema. Para ilustrar a natureza combinatorial do problema de localização, cita-se uma situação hipotética, em que um gestor de segurança pública deseja alocar m viaturas de polícia, em n bairros de uma cidade qualquer. Levando-se em consideração que em um determinado dia, o profissional dispõe de $m = 10$ viaturas para localizar em $n = 5$ bairros do município. Além do mais, cada uma das m viaturas podem ser alocadas em quaisquer um dos n bairros. Então, as possibilidades (combinações) de situar as m viaturas, nos n bairros, são dadas pela combinação de $\binom{m}{n}$, ou seja, $\binom{10}{5}$, cujo resultado é 252 possíveis soluções. Entretanto, duplicando-se o número m de viaturas, isto é, passando de 10 para 20 veículos, haverá 15.504 combinações possíveis. Observa-se que o número de combinações (soluções) não dobrou, quando se duplicou o número de viaturas. Significa-se pois que o número de combinações (soluções) encontradas não se comportou de forma semelhante que o total duplicado de viaturas. De maneira que, para 10 viaturas terá uma solução ótima, dentre as 252 combinações possíveis, enquanto para 20 viaturas, uma solução é escolhida dentre as 15.504 possibilidades apresentadas para alocação em 5 bairros. Esta discrepância ocorre porque a medida que se aumenta o número de facilidades, o número de soluções possíveis aumenta de forma exponencial, elevando-se o tempo computacional para encontrar a melhor solução. Contudo, embora o problema seja formalmente da classe NP-Difícil, "grandes instâncias de rede, baseada em problemas de cobertura de conjunto de localizações tem sido resolvido de forma relativamente fácil usando programação linear inteira" (REVELLE, 2005).

Os modelos matemáticos têm sido resolvidos através de métodos exatos e métodos aproximados. Por meio dos métodos exatos é possível identificar a solução ótima global, de modo que para os parâmetros apresentados não terá outra solução melhor. Por outro lado, com o emprego de abordagens heurísticas (métodos aproximados) pode-se encontrar uma boa solução (ótima local), a qual representa uma solução aproximada da solução ótima, porém, nada garante que seja a solução ótima global.

De acordo com Rodrigues de Oliveira (2005), dentre as ferramentas da Programação Matemática, a Programação Linear Inteira utiliza algoritmos exatos para encontrar soluções ótimas globais para qualquer instância de um problema de otimização. São exemplos de algoritmos exatos: o método Branch and Bound (B&B), Algoritmo de Cortes de Gomory e Relaxação Lagrangeana. Esses métodos exatos são capazes de garantir uma solução matematicamente ótima, identificando a melhor solução dentre todas obtidas para o problema.

2.3.1 Classificação dos modelos de localização

Mediante revisão da literatura sobre os modelos de localização realizada por Owen e Daskin (1998), Klose e Drexler (2005) e Lorena (2005), verifica-se que os modelos matemáticos podem ser classificados como: estático e dinâmico, determinístico e estocástico.

Nos modelos estáticos e dinâmicos, observa-se a existência, ou não, do fator tempo no problema. Quando o modelo não depende do tempo, diz que o modelo é estático. Entretanto, quando a determinação do tempo é uma condição necessária para tratar o problema, fala-se de modelo dinâmico. Neste último, leva-se em consideração a questão espaço-temporal para localizar facilidades, de forma que onde e quando localizar, devem ser observados simultaneamente.

A presença, ou não, de incertezas (referentes a parâmetros, tais como: tempo de deslocamento, custos de construção, quantidade ou locais de demandas para localização de instalações) classifica os modelos em dois grupos: Modelos estocásticos (sujeitos a incertezas) e Modelos determinísticos (não-sujeitos a incertezas). Os modelos estocásticos ainda são subdivididos em duas outras categorias: probabilística ou planejamento do cenário. Nos modelos probabilísticos, existe a explícita consideração da distribuição de probabilidade associada às variáveis aleatórias. Enquanto na abordagem de planejamento do cenário, considera-se um conjunto de possíveis valores futuros para as diversas variáveis geradas pelos tomadores de decisão. Para Lorena (2003), os modelos probabilísticos começaram a ser implementados para "refletir o fato de que as ambulâncias operam como servidores em um sistema de filas e algumas vezes estão indisponíveis para responder os chamados".

2.3.2 Modelos de localização de facilidades e objetivos

Com base nos modelos citados na literatura, Gonçalves (2007) elaborou o esquema exibido na Figura 2.2 para auxiliar o entendimento e, conseqüentemente, a escolha correta do modelo ideal para cada problema.

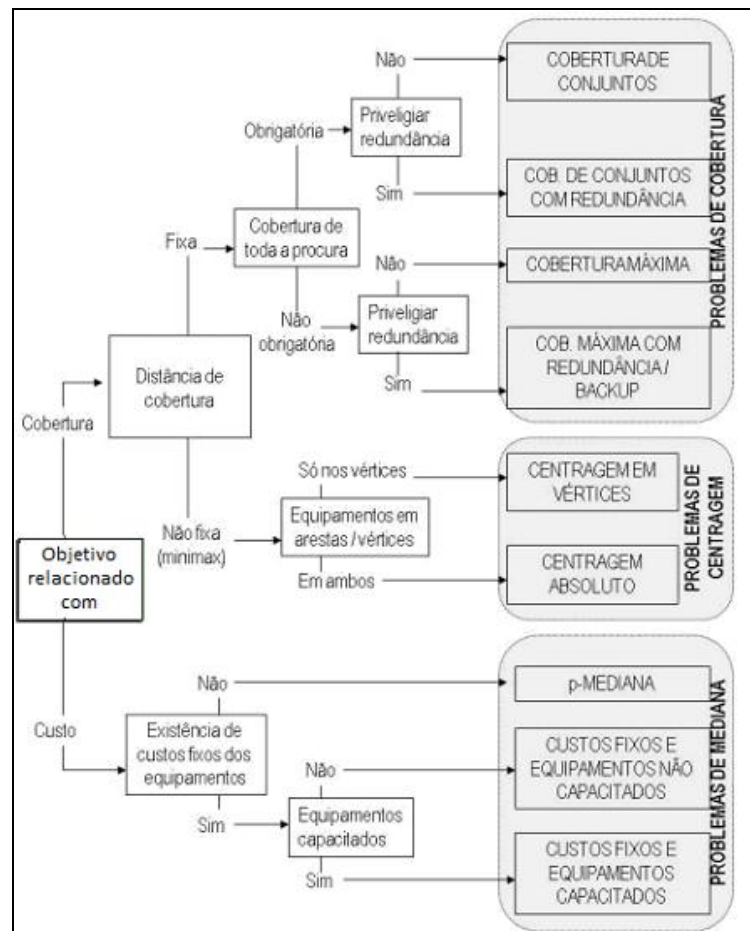


Figura 2.2 - Modelos de localização de facilidades
Fonte: (GONÇALVES, 2007 apud COSTA, 2010)

Nota-se que para os modelos evidenciados por Gonçalves, (2007), cobertura e custo estão relacionados com o objetivo do problema. Além do mais, estes dois conceitos (cobertura e custo) representam os primeiros fatores a serem analisados para decidir pela escolha de um modelo a ser implementado, mediante problema de localização de facilidades específico. No caso de um problema ter a cobertura como enfoque principal, para seleção mais adequada do modelo deve-se verificar a existência de uma distância de cobertura, a qual pode ser fixa ou não. É preciso ainda saber sobre as condições impostas para integrar o modelo, tais como: se a cobertura é obrigatória ou não e se haverá o privilégio de utilizar redundância de facilidades. Deste modo, para justificar a escolha do Modelo de Máxima Cobertura com Redundância, a distância da cobertura deve ser fixa, a cobertura para toda a demanda não é obrigatória e o gestor também pode optar pela redundância de facilidades.

Nos problemas de cobertura, geralmente, é entendido por distância de cobertura uma medida que não deve ser ultrapassada. Trata-se da métrica que é imposta (distância, custo ou tempo de deslocamento) para permitir a acessibilidade entre os elementos da demanda e as facilidades associadas (bens ou serviços). Neste caso, o número de facilidades a localizar é gerado como parte da resolução do problema (DASKIN, 1995; GALVÃO *et al.*, 2000; SMITH *et al.*, 2007; GONÇALVES, 2007; COSTA, 2010).

Na prática, haverá situações em que se pode considerar inviável, ou não desejável, a associação entre facilidades e pontos de demanda nos casos de atendimentos acima da métrica definida para a distância de cobertura. Surge, pois, a noção de cobertura, com a qual se reforça que uma assistência viável é toda aquela que estiver dentro do valor pré-estabelecido para a distância de cobertura. De tal maneira, é que se diz que uma facilidade cobre um ponto de demanda, quando "a acessibilidade entre eles for menor que a distância de cobertura", (GONÇALVES, 2007; COSTA, 2010).

Sendo assim, a noção de cobertura está diretamente relacionada a uma medida definida antecipadamente para caracterizar a distância (tempo) máxima que separa o cliente do serviço. Essa distância (tempo) é considerada uma medida crítica (padrão) porque é através dela que é definido se uma área de demanda está coberta ou não. De modo que, uma área de demanda é considerada coberta por uma facilidade, quando a distância ou o tempo, entre um cliente e a facilidade mais próxima, não for maior do que um valor pré-determinado, S , o qual representa o padrão de distância ou tempo, independentemente da facilidade (ou serviço) estar ou não disponível quando o serviço for solicitado. Neste sentido, para maximizar a cobertura de uma área de demanda, busca-se minimizar a distância/tempo crítica definida. Isto porque, o ponto de demanda que estiver além da distância crítica é considerado não coberto. (ARAZ *et al.*, 2007; CURTIN, 2010; SHER, 2010). O valor da distância de cobertura pode ser fixo e previamente definido ou atribuído com base na quantidade de facilidades a situar no espaço geográfico. Para Gonçalves (2007), "esta distinção se revela na separação entre os problemas de cobertura de conjuntos e problemas de cobertura máxima".

Nesta linha de raciocínio, Costa (2010) enfatiza que a escolha do modelo de localização está condicionada ao objetivo principal do problema. Dentre outros objetivos que podem ajudar na escolha do modelo, cita-se: minimizar a distância, maximizar a cobertura e minimizar o número de facilidades.

Para melhor compreensão, na Figura 2.3 se exibem espacialmente os objetivos citados para a escolha de um modelo de localização de facilidades.

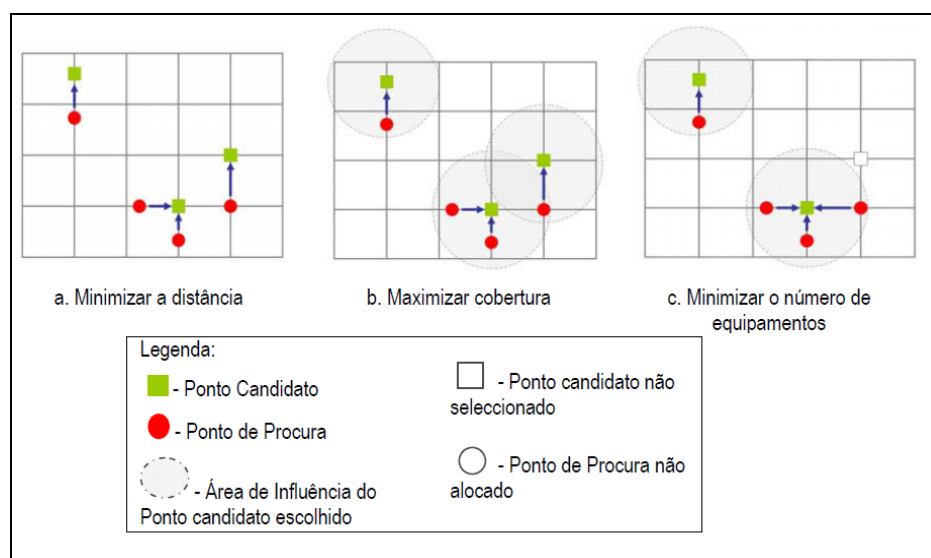


Figura 2.3: Exemplos de objetivos de problemas

Fonte: Costa (2010)

Associando-se os modelos exibidos por Gonçalves (2007) na Figura 2.2 e os objetivos da Figura 2.3 citados em Costa (2010), busca-se fazer uma correlação de cada modelo com o respectivo objetivo, para apresentar os modelos adequados para cada objetivo:

- **Minimizar a Distância.** Quando o objetivo do problema requer minimizar a distância percorrida, busca-se encontrar locais para situar p -facilidades, de tal maneira que a distância total, entre os pontos de demanda e as respectivas facilidades, seja minimizada. Nestes casos, deve-se utilizar o problema de localização de p -medianas cuja distribuição espacial está representada na Figura 2.3a.
- **Maximizar a Cobertura.** Com o objetivo de maximizar a cobertura, os recursos/serviços disponíveis devem atender (cobrir) o máximo possível de clientes, dentro de uma distância/tempo aceitável, com um número fixo de facilidades. Nesta abordagem não se tem compromisso de atender toda a demanda, mas sim o número máximo que puder. As facilidades são posicionadas em pontos candidatos, de maneira que o maior número de pontos de demanda seja alocado à solução, dentro de um determinado valor que limita a área de influência. Este tipo de problema é resolvido com o Modelo de Localização de Máxima Cobertura de Conjuntos, o qual é muito empregado para localizar serviços de emergências médicas e viaturas de polícia, uma vez que a rapidez para chegar no local do incidente (ponto de demanda) é fator primordial. (Figura 2.3b).
- **Minimizar o número de facilidades.** Muito parecido com o problema anterior. Difere, apenas, na definição prévia do número mínimo de equipamentos a localizar, necessário para garantir certo nível aceitável de cobertura (assistência) a todos os

clientes. As facilidades são situadas em pontos eleitos, de modo que um grande número de pontos de demanda possível (quanto mais, melhor) estejam dentro de um determinado valor padrão que limita a área de influência. Para atender este objetivo, deve-se utilizar o Problema de Cobertura de Conjunto. (Figura 2.3c)

2.3.3 Modelos determinísticos de localização

Conforme Broctcorne et al (2003 *apud* Lorena, 2003), os primeiros modelos retratavam problemas de localização estáticos e determinísticos, de modo que as questões estocásticas envolvidas eram desprezadas. São exemplo de modelos determinísticos: p -medianas, Modelos de Cobertura de Conjuntos e Modelos de Máxima Cobertura.

2.3.3.1 Problemas de p -medianas

O modelo de p -medianas, formulado por Hakimi (1964), é um problema clássico de localização de facilidades. Consiste em um dos mais populares modelos de locação-alocação utilizado para indicar a localização de facilidades, assim como, a alocação de pontos de demanda para uma ou múltiplas facilidades. Em um problema de p -medianas, busca-se selecionar uma solução p , em dados n pontos candidatos e m pontos de demanda com determinado peso (como por exemplo, número de pessoas que residem no bairro, prioridade de incidente), de modo que, a soma dos custos da distância de cada ponto m ao ponto p mais próximo seja minimizado. Deste modo, procura-se que as facilidades atendam a um conjunto de pontos de demanda, de maneira que, a soma das distâncias ponderadas entre cada ponto de demanda e a facilidade associada a demanda seja a menor possível. Mediante minimização da distância ponderada, maximiza-se a acessibilidade aos pontos de oferta. Sendo assim, um maior número de pessoas terá acesso às facilidades, dentro da menor distância média possível e com o menor custo, que dentre outros parâmetros os custos podem ser: tempo de viagem, tempo de resposta, prejuízo financeiro (SOUZA E NOVAES, 2006 *apud* COSTA, 2010; GALVÃO *et al.*, 1999; MAPA *et al.*, 2006).

De uma maneira geral, o problema de p -medianas tem como objetivo encontrar a localização de p centros (medianas) mapeados em uma rede, de modo que seja minimizada a soma das distâncias de cada vértice ao centro mais próximo. No final, todas as p -medianas encontradas representarão os pontos para localização das p facilidades que se almeja distribuir no espaço geográfico. Existem problemas que tem como solução uma única mediana (um único vértice), são os chamados de 1-mediana. Contudo, naqueles problemas em que se verificam mais de uma mediana ($p > 1$) como solução, de maneira sugestiva, são nomeados de 2-medianas, 3-medianas, e

assim por diante, até ser generalizado como problemas de p -medianas, onde p representa o número de medianas (vértices) do modelo.

Trata de um problema de otimização combinatorial, caracterizado como sendo da classe NP-Difícil. Devido a natureza combinatorial do problemas de p -medianas, o número de soluções cresce exponencialmente. (GAREY e JOHNSON, 1979 *apud* LORENA, 2001; SMITH *et al*, 2007; COSTA, 2010). Deste modo, a título de exemplo, para um problema com 10 pontos de demanda e 5 pontos candidatos a posicionar facilidades, a melhor solução será 1 dentre 252 possíveis soluções.

A seguir, o problema de p -medianas será formalmente enunciado. Seja um grafo $G = (V, E)$, onde V representa um conjunto, finito e não vazio, de vértices (pontos de demanda). Enquanto E corresponde a um conjunto de ligações entre os vértices, chamadas de arestas, as quais são representadas por pares ordenados de elementos distintos de V . Encontrar um subconjunto de vértices de V , ($V_p \in V$), de forma que $V_p = P$, onde P pode ser variável ou fixo, de tal forma que a soma das distâncias de cada vértice restante em V até seu vértice mais próximo em V_p seja a menor possível.

De acordo com Lorena (2001), os problemas de p -medianas podem ser modelados como problemas de programação inteira 0-1. Além do mais, Lorena (2001) considerou "sem perda de generalidade" que as medianas são escolhidas do próprio conjunto de vértices apontado no problema. Neste sentido, a formulação do modelo matemático, para problemas de p -medianas sem restrições de capacidade, é dada por:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \quad (2.1)$$

$$\text{s.a: } \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad \forall i \in N \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{jj} = P \quad (2.3)$$

$$x_{ij} \leq x_{jj}, \quad \forall i, j \in N, i \neq j \quad (2.4)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in N \quad (2.5)$$

Onde: $N = \{1, \dots, n\}$, sendo N o número de vértices na rede; P é o número de centros (medianas) a serem localizados; $D = [d_{ij}]_{n \times n}$, com $d_{ij} = 0$, para todo $j \in N$ é uma matriz de custo (distância) e $X = [x_{ij}]_{n \times n}$, a matriz de alocação, com:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o vértice } i \text{ é atendido pelo centro } j, i \neq j; \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$x_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{se o vértice } j \text{ é um centro;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

As restrições (2.2) e (2.4) garantem que cada vértice i seja alocado a somente um centro j , que deve ser uma mediana. A restrição (2.3) determina o número exato de medianas a serem localizadas (P) e (2.5) corresponde às condições de integralidade.

Nos problemas de p -medianas não se incluem, habitualmente, conotações de urgência. O uso desse modelo é apropriado para os casos em que cada cliente seguidamente percorre a distância entre a origem dele (cliente) e o local que oferece o serviço, tornando-se conveniente minimizar o somatório de tais distâncias. A localização de escolas entre bairros, na visão de Pizzolato *et al* (2012), "é um caso típico de problemas de p -medianas porque se observa um deslocamento diário que começa da residência do aluno, até a escola e de volta, da unidade de ensino para a residência do aluno". Em casos semelhantes, justifica-se ainda o uso de p -medianas para localização de: bebê/creche; gestante/maternidade; enfermo/posto de saúde, dentre outros. De um modo geral, de acordo com Arroyo (2006), em um problema de p -medianas deseja-se instalar uma facilidade para atender dentro de uma distância mínima, um conjunto espacialmente de pontos de demandas. Nota-se que para atender os pontos de demanda da Figura 2.4 a foram definidas três medianas, caracterizando um problema de 3-medianas. (ver Figura 2.4 b)

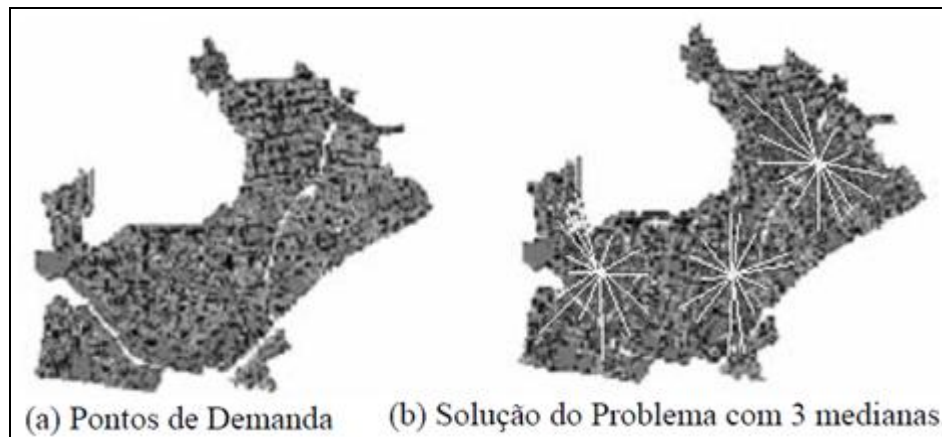


Figura 2.4 Exemplos de p -medianas

Fonte: (ARROYO, 2006)

O problema de p -medianas é estudado em problemas de serviços médicos emergenciais por: Berlin *et al* (1976), Carson *et al* (1990), Serra (1998), Paluzzi (2004), Caccetta *et al* (2005) e Ji *et al* (2007 *apud* Bandyopadhyay, 2012). Aplicações na área de segurança pública podem ser vistas em: Mitchell (1972), Cutin (2010) e Gurgel (2010). Curtin *et al* (2010) trabalharam com o problema de p -medianas na busca de reduzir o tempo de deslocamento de uma viatura policial até o local da ocorrência emergencial.

2.3.3.2 Problema de Cobertura de Conjunto (*Set Covering Problem*)

Originalmente proposto por Toregas, Swain, ReVelle and Bergman (1971), o Problema de Cobertura de Conjuntos (PCC) visa a minimização do número de facilidades necessárias para garantir certo nível de cobertura a todos os clientes. Assume-se que com um conjunto finito de localizações é suficiente para cobrir toda a demanda, dentro de uma distância ou tempo de deslocamento máximos aceitáveis. Sendo assim, o modelo de cobertura de conjuntos baseia-se na distância ou tempo de deslocamento máximos aceitáveis, buscando a minimização do número de facilidades necessárias para garantir certo nível de cobertura a todos os clientes (SHER, 2010).

Com o PCC, que é muito utilizado na localização de serviços de emergência, pretende-se minimizar o custo total das facilidades e as restrições asseguram que cada ponto de demanda seja coberto por, no mínimo, um equipamento Gonçalves (2007) reforça que o conjunto dos pontos de oferta que cobrem os pontos de demandas é obtido, normalmente, levando-se em consideração critérios de acessibilidade tais como máximas distâncias ou máximo tempo de acesso.

Em Lorena (2005), extrai-se que o Modelo de Cobertura de Conjunto apresentado por White e Case (1974) visa localizar o menor número de ambulâncias, de tal maneira que todos os nós de demanda, tenham no mínimo, uma ambulância, inicialmente situada, dentro do padrão de cobertura r . Esta situação sugere que cada pessoa da população poderá ser atendida por pelo menos uma ambulância posicionada, dentro do padrão mencionado. Entretanto, ainda conforme Lorena (2005), o "problema considera que toda população está totalmente coberta, mesmo quando a ambulância estiver atendendo, o que pode inviabilizar o modelo". Além do mais, este modelo desconsidera o fato de que, quando uma ambulância estiver ocupada porque foi acionada para atender uma chamada, alguns nós de demanda ficarão descobertos do serviço emergencial. Porém, na realidade quando a viatura estiver empenhada em uma chamada, a população que dependeria daquele veículo ficará sem atendimento, até que uma nova ou a ambulância do setor fique disponível novamente.

Formalmente, o modelo básico de PCC é definido como segue. Dado dois conjuntos: o conjunto universo U dos elementos a serem cobertos e um segundo conjunto Q composto por subconjuntos de elementos de U . O objetivo do PCC é cobrir todos os elementos de U utilizando o menor número possível de subconjuntos pertencentes a Q . Um dado elemento $u \in U$ é dito coberto por um subconjunto $Q_i \in Q$ se $u \in Q_i$. Uma coleção $S \subseteq Q$ é uma solução de PCC se todo elemento de U é coberto por pelo menos um dos subconjuntos em S , ou seja, $\bigcup_{Q_i \in S} Q_i = U$. Quando a cada subconjunto $Q_i \in Q$ estiver associado um custo c_i , o objetivo do PCC é selecionar

um subconjunto $S \subseteq Q$ onde $\bigcup_{Q_j \in S} Q_j = u$, de tal forma, que a soma dos custos destes objetos seja mínima, ou seja, deseja-se minimizar $\sum_{Q_i \in S} c_i$ (GONÇALVES, 2010).

2.3.3.3 Problema de Localização de Máxima Cobertura (*Maximal Covering Location Problem*)

Com origem nos meados dos anos 70, através de Church and ReVelle (1974), o Problema de Localização de Máxima Cobertura (PLMC) tem como objetivo encontrar a solução para o problema de localização de facilidades que maximize a cobertura da procura de serviços dentro de uma determinada distância aceitável (ou tempo de resposta).

No problema de máxima cobertura, pretende-se maximizar a cobertura para os pontos de demanda, sendo que as restrições especificam as condições de cobertura de um elemento, assim como avalia as definições impostas ao número máximo de equipamentos (GONÇALVES, 2007).

Em conformidade com Brotcorne et al (2003 *apud* Lorena 2003), no Modelo de Cobertura de Conjuntos não é considerada a distância existente entre os nós na rede, no entanto, exige-se que todos os pontos de demandas sejam cobertos, independente do tamanho da população e da necessidade do serviço. Neste sentido, visando relaxar esta exigência existente no PCC, Church e ReVelle (1974) apresentaram um problema que não requer cobertura total de todos os nós, partindo-se do princípio que para atender toda a população, faz-se necessário a existência abundante de recursos, o que torna muitas vezes inviável economicamente a solução, principalmente quando o serviço é público devido a escassez de recursos financeiros. Intitulado de Problema de Localização de Máxima Cobertura (PLMC), o modelo proposto por Church e ReVelle (1974) fixa o número p de facilidades, o qual pode ser insuficiente para cobrir toda a população, dentro do padrão de cobertura. Ainda segundo Lorena (2003), neste modelo "o objetivo é maximizar a população ou o número de chamada cobertas dentro do padrão S ."

Para localização de ambulâncias, Lorena (2005) afirma que o modelo PLMC prevê uma restrição associada a questão "orçamentária que limita o número de ambulâncias", representando uma quantidade menor de veículos emergenciais, quando comparado com o quantitativo empregado no Modelo de Cobertura de Conjunto. Ainda para Lorena (2005), o modelo PLMC também é uma ferramenta de planejamento que proporciona ao administrador que tem restrições no orçamento, informações sobre onde localizar as ambulâncias para atender o máximo de pessoas, com os recursos disponíveis.

Deste modo, vislumbra-se que o Problema de Localização de Máxima Cobertura foi desenvolvido com a finalidade de identificar uma solução de compromisso, de qualidade, que proporcione níveis de cobertura aceitáveis e seja financeiramente mais acessível às autoridades

públicas. Sendo assim, Church e Reville (1974) reforçam que o objetivo do PLMC é localizar um número pré-especificado de p facilidades, tal que a máxima população possível de uma dada região esteja coberta a menos de uma distância (tempo) crítica S pré-definida. Neste modelo, assume-se que pode não haver facilidades suficientes para atender todos os n nós da demanda.

O Modelo de Localização de Máxima Cobertura pode ser visto como uma variação dos modelos de p -medianas e de Cobertura de Conjuntos. Embora pertença a classe dos problemas NP-Difícil, devido a complexidade combinatorial que apresenta, o PLMC também tem sido resolvido por métodos exatos, através da programação linear inteira, com tempo computacional considerado bom. No entanto, muitas heurísticas têm sido implementadas para obter uma boa solução (CHURCH e REVELLE 1976; COSTA, 2010; CUTIN, 2010).

Como extensão dos problemas de máxima cobertura, registra-se o Problema de Máxima Cobertura com Redundância (*backup*) - PLMCR o qual permite existir a redundância (*backup*) de facilidades no modelo. O conceito de redundância está associado ao número adicional de facilidades adotado para melhorar o atendimento. Sendo assim, ao considerar a redundância, o PLMCR possibilita que a cobertura contemple a utilização de mais de uma facilidade para proporcionar maior benefício, quando necessário, para atender um ponto da demanda. Logo, a redundância é opcional, mas aumenta a possibilidade de atendimento à demanda, devido a existência de facilidades de apoio. Utiliza-se, pois, um modelo de cobertura extra (adicional) para garantir que a demanda esteja coberta, mesmo quando uma facilidade estiver realizando um atendimento. Para se operacionalizar a cobertura *backup*, uma alternativa é posicionar as facilidades de maneira que se garanta a cobertura extra. Cita-se, como por exemplo, o uso da cobertura redundante, na cobertura de um bairro por mais que uma viatura ou ambulância. Segundo Gonçalves (2007), o número de facilidades que deve ser empregado em uma situação de redundância pode ser imposto como valor mínimo ou valorado no objetivo dos problemas.

2.3.4 - Modelos para localização de serviços emergenciais

Nos serviços públicos emergenciais a quantidade e o lugar onde a viatura é posicionada, geralmente influenciam na qualidade do serviço prestado. Embora se saiba que a eficiência do serviço emergencial é uma questão crucial, na administração pública, aumentar o número de veículos da frota escassa, consiste em um problema conjuntural que pode ser limitado por questões econômicas, políticas ou administrativa (ARAZ *et al*, 2007; SHER, 2010; CURTIN, 2010). No entanto, é importante que as veículos estejam posicionadas em pontos estratégicos para atender a população o mais rápido possível.

A literatura aponta que os principais fatores determinantes para localização de facilidades em serviços emergenciais são: distância e tempo de atendimento. Porém, Sher (2010) complementa que a cobertura é um dos mais importantes objetivos que reflete na qualidade do serviço de emergência. A existência de regras e protocolos voltados para a qualidade e eficiência, também, é fundamental nas Empresas/organizações porque definem as métricas que devem ser alcançadas com a prestação do serviço. Church (2001 *apud* Sher, 2010) enaltece um protocolo destinado a serviços de emergência médica no qual se define o atendimento considerado padrão. De acordo com o prescrito no protocolo, para uma prestação de serviço eficiente, exige-se que uma facilidade esteja habilitada para atender, em até 8 (oito) minutos, 90% das chamadas para um serviço de emergência médica.

Para ilustrar um problema de localização de serviços emergenciais, considera-se a necessidade de localizar viaturas da Polícia Militar em uma determinada cidade, de forma que, mediante uma chamada ao serviço 190, a população que mora ou se encontra no município possa ser atendida pela força policial, em um tempo máximo de até 15 minutos. Na fase de análise, verifica-se que 15 minutos corresponderá ao tempo de resposta que representa a métrica de cobertura. O problema consiste em determinar a quantidade mínima de unidades móveis da polícia e as respectivas localizações na cidade, de tal maneira, que o máximo número de pessoas (pontos de demanda) possa ser atendido, em até 15 minutos, por algum desses veículos oficiais.

Nessa linha de raciocínio, Araz *et al* (2007) reforçam que viaturas operacionais de polícia devem ser localizadas, de maneira tal, que possam alcançar qualquer ponto da demanda dentro de um tempo de resposta máximo, previamente definido. Em Sher *et al* (2008) busca-se, através da integração de métodos exatos e Sistema de Informação Geográfica - SIG, resolver o problema de alocação de viaturas numa área específica do Norte de Israel com objetivo de maximizar a cobertura de estradas com patrulhas de polícia. Na pesquisa, o tempo de resposta considerado foi de no máximo 20 minutos e uma cobertura equivalente a 27 km, conforme valor definido no protocolo corrente de chamadas da Polícia Israelense. Ressalta-se que o protocolo de chamadas da Polícia de Israel exige que o tempo máximo para uma viatura chegar até o local da ocorrência, seja de 20 minutos, o qual é medido a partir da solicitação do serviço. Este tempo é traduzido em 27 km (quando o deslocamento da viatura for a uma velocidade de 80 km / h em média) referente a restrição de cobertura (SHER *et al*, 2008).

Uma desvantagem dos modelos citados na literatura para resolver problemas de localização de serviços de emergência é que eles partem da hipótese de que as facilidades sempre estão disponíveis quando solicitadas. No entanto, essa afirmação de sempre disponibilidade de recursos só é observada em sistemas não congestionados, ou seja, em sistemas com pouca demanda. Em sistemas considerados congestionados, como é o caso de serviço de ambulância e viaturas de

polícia, não é aceita a hipótese da sempre disponibilidade de recursos (LORENA, 2003). Na prática, pode ocorrer da facilidade não estar disponível e a demanda não ser atendida, dentro do tempo padrão, em virtude de diferentes fatores, tais como: o tempo decorrido para atender o incidente anterior e o número reduzido de veículos. Segundo Lorena (2003), este fenômeno definido de congestionamento, em serviços de atendimento de emergência, é um dos causadores da não disponibilidade de uma facilidade, a menos da distância/tempo crítica. Contudo, foi exatamente o congestionamento que motivou o desenvolvimento dos modelos de localização com cobertura adicional (*backup coverage*) por Hogan *et al* (1986) e, posteriormente, dos modelos de cobertura probabilísticos por Daskin (1982) e ReVelle *et al* (1989).

Utiliza-se um modelo de cobertura *backup* (cobertura extra, adicional ou de apoio) para garantir que a demanda esteja coberta, mesmo quando uma facilidade esteja ocupada. Pode ser empregado o modelo de cobertura *backup*, por exemplo, na cobertura de um bairro por mais do que uma ambulância. Neste caso, para resolver o problema referente a demanda descoberta quando uma ambulância estiver realizando um atendimento, Em Lorena (2005) foi proposto utilizar os modelos de cobertura extra. De modo que, a demanda seja coberta por uma outra ambulância, que não seja o veículo primário, em tempo aceitável. Sendo assim, uma alternativa é posicionar as facilidades de maneira que se garanta a cobertura extra. O número de facilidades que efetiva uma situação de redundância pode ser imposto como valor mínimo ou valorado no objetivo do problema. Caso seja imposto, em conformidade com Gonçalves (2007), formulam-se genericamente problemas de cobertura considerando nas restrições o número mínimo aceitável de equipamentos associados a cada elemento de procura.

2.4 - Modelos matemáticos e Geoprocessamento

Para Câmara *et al* (2001), "compreender a distribuição espacial de dados oriundos de fenômenos ocorridos no espaço, constitui um grande desafio para a elucidação de questões centrais, em diversas áreas do conhecimento", como saúde, geologia e segurança pública. Além da percepção visual da distribuição espacial do problema, é muito útil traduzir os padrões existentes com considerações objetivas e mensuráveis, como se observa no exemplo, em que: Deseja-se investigar se existe alguma concentração espacial na distribuição de crime, em uma cidade, para localizar viaturas. O número de viaturas será suficiente para cobrir toda a área? Esse problema faz parte da análise espacial de dados geográfico. O objetivo precípua da Análise espacial é mensurar propriedades e relacionamentos, levando em conta, a localização espacial do fenômeno em estudo de forma explícita. Ainda para Câmara *et al* (2001), quando "onde localizar é importante para o

negócio”, então Geoprocessamento será uma grande ferramenta de trabalho, para auxiliar na tomada de decisão.

Desta forma, conforme exposto na Figura 2.5, o Geoprocessamento é um conjunto de técnicas relacionadas ao tratamento de informações espaciais. Além do mais, denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica e que vem influenciando de maneira crescente as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional (CÂMARA *et al*, 2001).



Figura 2.5- Definição de Geoprocessamento
Fonte: Francisco (2006)

Segundo Aronoff (1989), as ferramentas computacionais para Geoprocessamento são chamadas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), as quais permitem coletar e integrar dados, efetuar análises espaciais, assim como possibilitam criar bancos de dados georreferenciados.

2.4.1 Sistema de Informação Geográfica (SIG)

De acordo com Câmara (2005, p.12), o termo Sistema de Informação Geográfica (SIG) é aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos, sendo as suas principais características “inserir e integrar, numa única base de dados, informações espaciais”, além de “oferecer mecanismos para combinar as várias informações, através de manipulação e análise, bem como para consultar, recuperar e visualizar o conteúdo da base de dados geográfica”.

Uma das características de um SIG é a capacidade de armazenar e manipular dados convencionais e espaciais de forma integrada, contribuindo para a análise espacial e consulta aos dados. Esta capacidade de armazenar tanto os atributos descritivos como as geometrias dos

diferentes tipos de dados geográficos é a principal diferença de um SIG para um sistema de informação convencional (CÂMARA, 2005).

Na Figura 2.6, nota-se que dados alfanuméricos e dados espaciais são tratados de forma integrada pelo Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD) para que um SIG possa operar com tais dados para gerar informações geoespaciais e mapas temáticos.

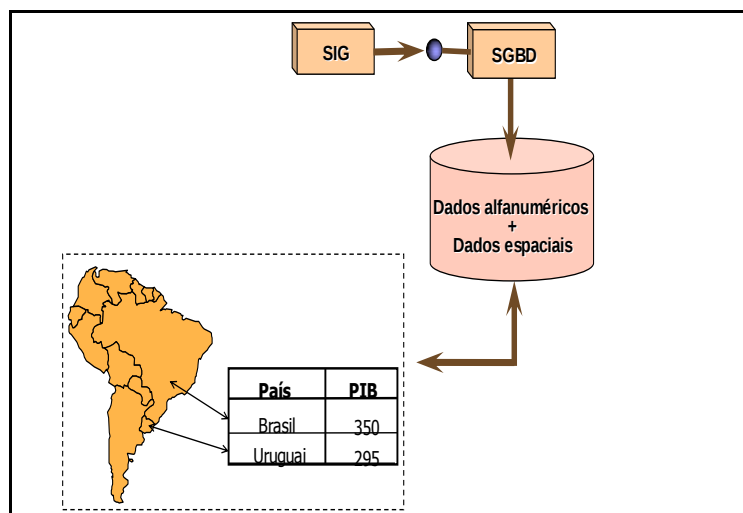


Figura 2.6 Integração de dados no SIG
Fonte: Câmara (2005)

Existem três maneiras básicas de utilização de um SIG:

- Como ferramenta para produção de mapas, os quais traduzem a representação estática da realidade.
- Como suporte para análise espacial de fenômenos geográficos.
- Como um banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial, na maioria das vezes com auxílio de linguagem de consultas estruturada.

De um modo geral, um SIG é composto por pessoas, *hardware*, *software*, dados e metodologias, traduzidos em componentes apresentados por Câmara (2005, p.13) sobre a arquitetura de um Sistema de Informação Geográfica, como ilustrado na Figura 2.7.

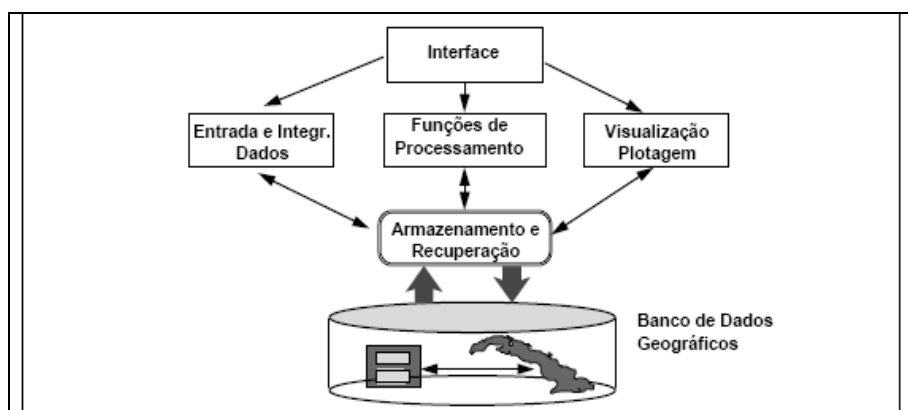


Figura 2.7 - Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica
Fonte: CÂMARA (2005)

A interface com o usuário, representa o elo de ligação entre o homem e a máquina. Corresponde à parte visível do sistema, apresentada em forma de telas, que permite ao usuário manipular as operações disponíveis na aplicação.

Num nível intermediário, encontram-se os componentes de entrada de dados (localizações geográficas, imagens obtidas por satélites, dados obtidos do GPS, digitalização), gerenciamento e processamento de dados geográficos, bem como a saída de dados, que é a visualização do resultado final do SIG (relatórios, mapas, produtos fotográficos, dentre outros)

No nível mais interno, encontram-se os componentes para armazenamento e recuperação dos dados, organizados sob a forma de banco de dados geográfico.

2.4.1.1 SIG e Modelos de localização de facilidades

Em virtude do SIG integrar diversas técnicas de tratamento de informação espacial, como coleta, armazenamento e análise de dados georeferenciados, torna-se uma poderosa ferramenta em muitas áreas, dentre elas na Pesquisa Operacional, em particular em problemas de localização. Church (2002) aponta que as primeiras aplicações de SIG em conjunto com problemas de localização surgiram na década de 70, quando a cartografia digital começava a ser empregada.

Os modelos de localização, assim como os SIGs, são considerados sistemas de apoio a decisão espacial que têm como atributos em comum, dados espaciais correspondentes a posições geográficas, representadas por um par ordenado (x,y) de coordenadas espaciais. Devido a capacidade de integrar diversas técnicas para o tratamento de informação espacial, os SIG são fundamentais em problemas de localização, para georreferenciar e, consequentemente, possibilitar a visualização da distribuição espacial das facilidades. Sendo assim, o uso de SIG pode contribuir para a rápida percepção visual de informações geográficas que não estavam evidentes, ampliando o entendimento de especialistas e usuários (LORENA *et al*, 2001; MAPA, 2006; CURTIN *et al*, 2010).

Do ponto de vista de Lorena *et al* (2001), "o uso combinado de SIGs e técnicas de Pesquisa Operacional para resolver problemas de localização ainda não está totalmente difundido na comunidade científica internacional". Porém, em Lorena (2001), aborda-se sobre integração de SIG e problemas de localização para resolver problemas de p -medianas.

Geralmente, conforme Costa (2010), o problema de localização é resolvido por métodos e software diversos, enquanto a visualização dos dados se processa com uso de SIG. Aplicações de SIG em conjunto com problemas de localização são identificados em: Costa (2010), para

identificar o melhor local para instalar um hospital em Lisboa-Portugal, Sher (2010) para alocar viaturas de polícia em estradas no Norte de Israel e Curtin (2010) para determinar a distribuição espacial eficiente de áreas de patrulhas de polícia.

Em Mapa (2005), aprende-se que a disponibilidade de uma base de dados geograficamente referenciada tem sido a principal motivação para se propor modelos de localização de facilidades, como ferramentas de auxílio à decisão espacial. Burrough (1998) enfatiza que a existência de uma base de dados georreferenciada contribui para que os Sistemas de Informações Geográficas sejam muito importantes nas fases de coleta e análises espacial desses dados.

Na Figura 2.8, exibem-se os três métodos de SIG apresentados por Yeh e Chow (1996) como sendo os mais utilizados em aplicações voltadas a localização de facilidades. Para Costa (2010), em geral, os dois primeiros métodos são aplicados juntamente com o terceiro, de forma que existe uma integração do uso deles.

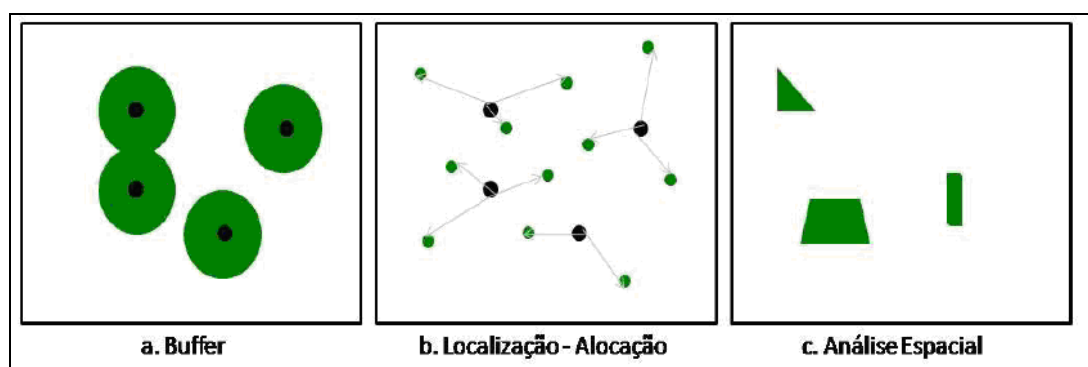


Figura 2.8- Funções de um SIG para planejamento de facilidades
Fonte: Extraída de Costa (2010), com base em Yeh e Chow, 1996

Os métodos citados são:

1. *Buffer* (Figura 2.8a). O conceito de *buffer* é utilizado em aplicações nas quais se precisam elaborar mapas de distância (*buffer zones*) que é uma das operações importantes de um SIG. Trata da área de influência construída a partir de um ponto qualquer. Deste modo, *buffer zones* são áreas construídas ao redor de um objeto mantendo uma certa distância. Para Câmara (2005), a determinação do *buffer* ao redor de um ponto é feita de forma direta, como uma circunferência de raio d . Costa (2010) complementa que este método permite encontrar áreas cobertas, ou não, por determinado serviço, no entanto, não leva em consideração a distribuição da população, nem a acessibilidade geográfica real à facilidade.
2. Algoritmos de *Location-Allocation*. (Figura 2.8b). Na aplicação de algoritmos de *Location-Allocation* permite-se alocar uma população ao equipamento mais próximo, levando-se em consideração o deslocamento em rede viária.

3. Análise espacial (Figura 2.8c). Consiste na análise da distribuição espacial para identificação da viabilidade de um espaço físico para localização de um equipamento, levando em consideração, um conjunto de fatores identificados pelo gestor.

2.4.1.2 Integração de SIG e problemas de p -medianas

De acordo com Lorena *et al* (2001), até a data do estudo, a integração de SIG e técnicas de Pesquisa Operacional para resolver problemas de localização, ainda não estava totalmente difundido na comunidade científica internacional. No entanto, posteriormente aquele período, já se verifica alguns exemplos de softwares SIG que integram algoritmos de localização são o Transcad (da Caliper), Idrisi (da IDRISI *Project*), MGE (da Intergraph), MapInfo (da MapInfo), Flowmap (da ILWIS) e os *softwares* ArcInfo e ArcGIS 10 (da ESRI) (LORENA *et al*, 2001; SMITH *et al*, 2007; COSTA, 2010).

No trabalho de Lorena *et al* (2001) é apresentado um algoritmo que possibilitou a integração de problemas de p -medianas aos SIGs: ArcView (da ESRI) e SPRING (INPE). Trata-se do algoritmo que reflete uma abordagem da heurística lagrangiana/*surrogate*, na qual a viabilização da solução dual é feita através de uma heurística de localização-alocação alternada. Este algoritmo foi integrado ao sistema de informações geográficas SPRING (versão 3.5), no ano de 2001, durante a realização do GisBrasil, em Curitiba. A interface de integração com o SPRING se deu através de um método criado, que atua na representação vetorial dos modelos de rede, temático e cadastral daquele SIG. Visando avaliar a eficiência do algoritmo de p -medianas integrado ao SPRING, Lorena *et al* (2001) realizaram alguns testes computacionais, com dados do município de São José dos Campos, variando até o máximo de 3282 vértices e 1141 centros, para o caso sem restrições de capacidade. No estudo, Lorena (2001) simula alguns objetos localizados em vértices da rede, como sendo possíveis pontos para instalação de algum tipo de atividade. A solução final identificou os quatro melhores locais para posicionar facilidades. Como Lorena *et al* (2001) trataram o tipo de atividade a ser posicionada, de forma genérica, vislumbra-se que o modelo de p -medianas integrado ao SPRING, também pode ser utilizado para resolver problemas de várias áreas do conhecimento, inclusive na segurança pública, para localizar viaturas policiais.

O Sistema para Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING) é um banco de dados geográfico de 2º geração, de domínio público, que pode ser adquirido gratuitamente, através do endereço <http://www.dpi.inpe.br/spring>. Tem por objetivo a integração e análise de diferentes tipos de dados espaciais (vetoriais e matriciais), assim como, integrar tecnologias de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica. Conforme Câmara (1995), o

Sistema contempla o modelo de dados orientados a objetos o que deriva a interface de menus e a linguagem espacial LEGAL (Linguagem Espaço-Geográfica baseada em Álgebra). Os tipos de dados tratados no SPRING são: temáticos (para representar um tema ou classe de informação), cadastrais ou mapa de objetos (representa um objeto geográfico que possui atributos e representação gráfica), rede (mapas cadastrais, com a diferença de que geralmente os objetos são representados por elementos lineares ou pontuais), modelo numérico de terreno (representação de uma grandeza que varia continuamente no espaço) e imagens (representam dados de sensoriamento remoto ou fotografias aéreas) (SPRING, 1998).

2.4.1.3 SPRING e Interpolador de Intensidade *kernel*

Muitos fenômenos, a exemplo de crimes, podem ser representados através da distribuição espacial das ocorrências, expressas como pontos localizados no espaço. Em uma distribuição de pontos no espaço, o número de ocorrências computadas por unidade de área é denominada de intensidade ou densidade (DRUCK, 2004). No entanto, a constatação de um número acima do esperado, excessivamente próximos, dessas ocorrências investigadas por unidade de área, simboliza a presença de aglomerados (*cluster*) na distribuição espacial. Sendo assim, a análise exploratória de um evento pontual começa pela estimativa da intensidade do fenômeno, visando detectar aglomerados espaciais. Estas estimativas são calculadas, através de interpolações, por métodos diversos, tais como o estimador de intensidade *Kernel*, o qual possibilita a estimativa da intensidade do evento, em toda a região de estudo, inclusive nos locais onde o processo não tenha gerado nenhuma ocorrência real. Esses conceitos são muito utilizados para identificação de zonas quentes de criminalidade (*hotspots*), já que segundo Beato (2008), o "estado da arte da análise espacial de crimes utiliza mapas de superfícies de *Kernel*".

De acordo com Câmara (2002), o estimador de intensidade *Kernel* para fazer interpolações "ajusta uma função bi-dimensional definida por k sobre os eventos considerados, compondo uma superfície cujo valor será proporcional à intensidade de amostras por unidade de área". Essa função k de estimativa, com propriedades de suavização do fenômeno, contabiliza o número total de pontos contidos dentro de uma região de influência que possui raio de tamanho τ .

A definição formal do estimador kernel segue. Dado $u_1, u_2, \dots, u_n$ como sendo o conjunto de localizações de n eventos observados em uma região A e que u representa uma localização genérica cujo valor deseja-se estimar. A intensidade pode ser estimada, através da fórmula geral do estimador de intensidade:

$$\hat{\lambda}_{\tau}(u) = 1/\tau^2 * \sum_{i=1}^n k(d(u_i, u)/\tau), d(u_i, u) \leq \tau$$

Onde, $d(u_i, u)$ é a distância entre o ponto u a estimar e a posição da observação u_i do evento.

Verifica-se ainda que o estimador *Kernel* depende de dois parâmetros: o raio de influência τ (que é definido pelo analista) e a função k de estimação com propriedades de suavização do fenômeno.

No Estimador de Densidade por *Kernel* do SPRING, a função de interpolação utilizada para k é (BAILEY e GATRELL, 1995):

$$K(h) = 3/\tau(1-h^2)^2$$

Onde, h é a distância entre a localização u a ser estimada e os eventos observados - $d(u_i, u)$.

Com o Estimador de Densidade por *Kernel* disponível no SPRING é possível gerar os mapas contendo *hotspots* de crimes. Para Harries (1974) e Chainey et al (2008) um dos significantes exemplos do uso de SIG é na determinação de *clusters* de crimes, ou seja, de *hotspots*.

2.5 Modelos de Localização de Facilidades e a técnica de clusterização *k-means*

Apresentado por McQueen (1967), *k-means* é um dos mais simples algoritmos de agrupamento, não supervisionado que não precisa ser parametrizado e nem acompanhado. Trata-se de uma das técnicas de mineração de dados que busca, através do processo de classificação, encontrar classes de dados, denominadas de *cluster*, dentro do conjunto amostral.

Segundo Oliveira (2012), um *cluster* representa um conjunto de dados que contém registros aglomerados, mais próximos entre si, cuja distância de proximidade pode ser melhor visualizada quando "os dados são plotados em um gráfico". Na Figura 2.8 é apresentado um exemplo de *clusters* extraídos de uma base de dados. Nota-se a existência de três *cluster* ou agrupamentos, que caracterizam as classes A, B e C, conforme propriedades adotadas. Cada ponto no gráfico da Figura 2.9 representa um registro de dados, que pode conter vários atributos, dentre eles uma coordenada cartesiana ou geográfica.

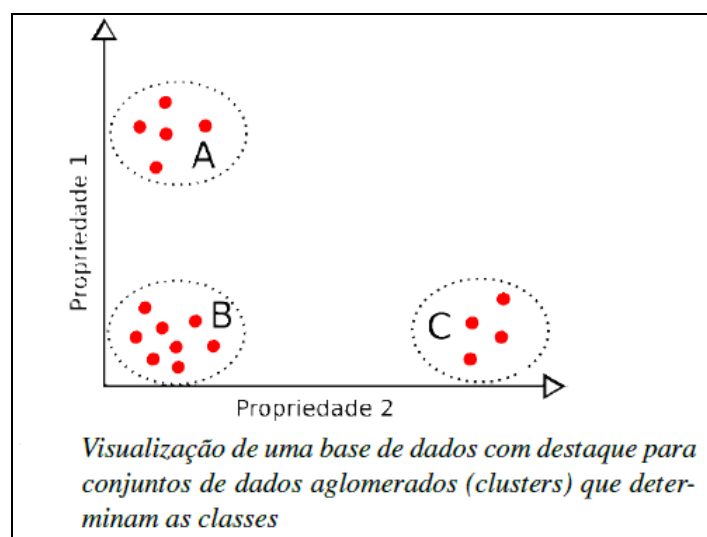


Figura 2.9 - Identificação de *clusters*
Fonte: Oliveira (2012)

Neste sentido, Oliveira (2012) aponta uma "relativa proximidade entre o problema de localização de clusters (identificação de classes) e o problema de localização de facilidades". De modo que a técnica de *clusterização* *k-means* possa ser empregado em problemas de localização de facilidades.

O problema de *k-means* será apresentado formalmente a seguir, conforme descrito em Mahajan (2009). Dado um conjunto finito $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ de pontos de demanda em R^m , e um inteiro $k \geq 1$, deve-se construir k grupos (*clusters*), de modo que os objetos alocados a cada um dos k *clusters* sejam similares entre si, segundo alguma função objetivo. Para tanto, deseja-se encontrar os k pontos (centróides) de um conjunto de k centróides, dado por $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$, de maneira a minimizar a soma das distâncias quadradas euclidianas, entre cada ponto de demanda em X e o respectivo centróide k .

A idéia principal é definir k centróides, para cada k *clusters* de um conjunto de dados que denotam um padrão ou classe. Um centróide é um ponto central em relação a um conjunto de outros pontos que compõem um *cluster* (aglomerado). A função de custo a ser minimizada, de modo bem simplificada, sem restrições, baseada em Hair *et al* (2005) e Oliveira (2012), pode ser formulada como:

$$\text{custo}(kmeans) = \sum_{k=1}^k \sum_{x_i \in C_k} d(x_i, x_{0k})$$

Onde, x_{0k} é o centróide do *cluster* c_k e $d(x_i, x_{0k})$ é a distância entre os pontos x_i e x_{0k} .

Um algoritmo *k-means* executa quatro passos até concluir o procedimento com a clusterização dos pontos. Serão apresentados os quatro passos executados por um algoritmo *k-means*, extraídos de Kaveh (2010):

Passo 1 - Mediante entrada de dados, o primeiro passo adotado pelo algoritmo *k-means* é gerar uma solução inicial. Para tanto, k centróides são selecionados randomicamente, como centróides iniciais de k *cluster* (Figura 2.10-a).

Passo 2 - Diante dos k centróides selecionados no passo anterior, cada ponto da demanda será alocado ao respectivo centróide mais próximo (Figura 2.10-b). Em seguida, os centróides gerados aleatoriamente deverão se mover para o centro dos *clusters*, de tal modo que k novos *cluster* serão criados (Figura 2.10-c).

Passo 3 - Para os cada k novos *clusters* criados, são recalculados novos k centróides para que exista uma nova alocação de pontos de demanda ao respectivo centróide mais próximo (Figura 2.10-d).

Passo 4 - Os passos 2 e 3 serão repetidos até que quando não existir mais mudanças na alocação dos centróides aos pontos de demanda (Figura 2.10-e). Nesta situação o algoritmo pára (Figura 2.10-f).

Para melhor compreensão, na Figura 2.10 serão apresentados os passos referentes aos procedimentos executados pelo *k-means*.

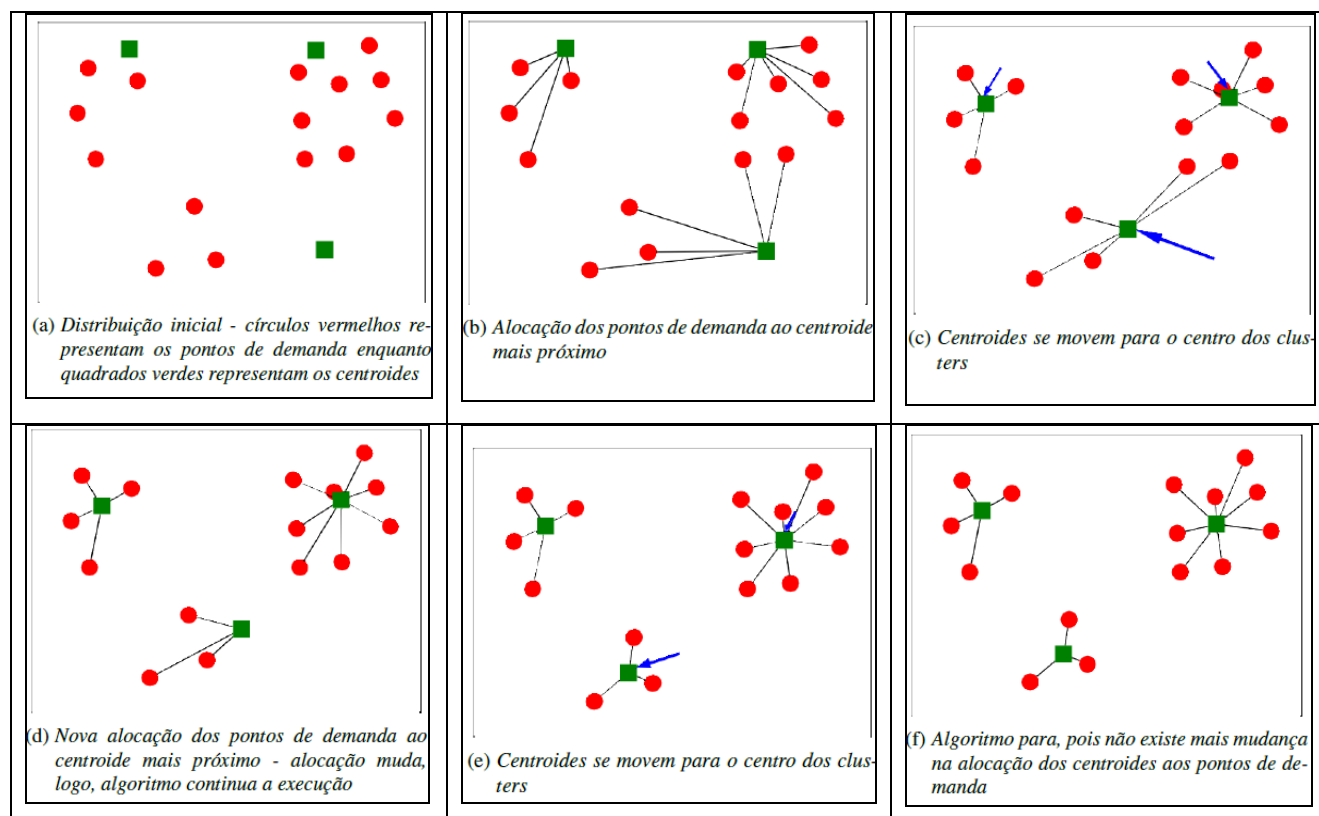


Figura 2.10. Passos do algoritmo do método *k-means*
Fonte: Extraído de Oliveira (2012)

2.4.2 Tecnologia WebGIS

Na Figura 2.11 é possível verificar que o ano de 1993 representa o marco da disseminação de geoinformações com a tecnologia WebGIS, através da grande rede de computadores. Este avanço se deu em virtude da existência do SIG (1962), Internet (1967) e consequentemente da Web Wide World ou WWW ou Web (1990). Verifica-se que o avanço foi possível devido a existência de SIGs e a popularização da Internet e da Web que juntos originaram a tecnologia WebGIS. Neste sentido, a WebGIS agrega recursos de SIG com tecnologias disponíveis na Internet, a exemplo da Web, para permitir a manipulação e hospedagem de dados na Nuvem. Trata-se de uma arquitetura *client-server*, com a qual mapas digitais são acessados por usuários que estão conectados a rede, através de um simples navegador (browser).



Figura 2.11 - Linha do tempo da WebGIS
Fonte: Extraída de FU e SUN (2012)

Sendo assim, a WebGIS é uma ferramenta de disponibilização de dados georreferenciados e mapas interativos, para consulta e manipulação, na Internet, através de um protocolo remoto, como o HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*). (CORREIA, 2011; FU e SUN, 2012). Na Figura 2.12 é exibida a arquitetura básica do sistema WebGIS, a qual se encontra no nível lógico. Consiste de qualquer SIG que utiliza a tecnologia Web para responder as solicitações originadas do lado cliente, decorrentes do pedido de um usuário. Deste maneira, para responder a solicitação do cliente, o servidor constrói uma página Web e entrega ao navegador como resposta da solicitação: mapas e informações geoespaciais.

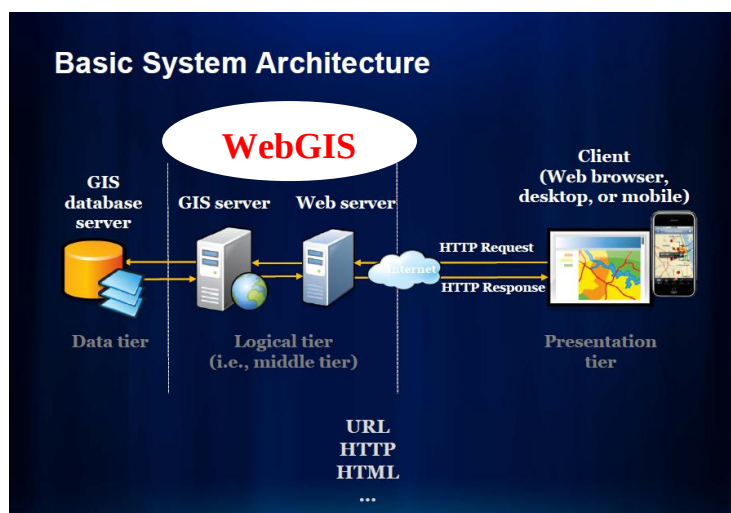


Figura 2.12 - Arquitetura básica do sistema WebGIS
Fonte: Extraída de FU e SUN (2012)

Nesta pesquisa empregou-se, como ferramenta de WebGIS, o *Google Maps* que disponibiliza API (*Application Programming Interface*) para construção de aplicativos, assim como fornece uma biblioteca de serviços por meio da linguagem de script *JavaScript* a qual é usada para desenvolvimento da interface de entrada e integração com o WebGIS. Utilizando-se a API *Matrix Distance* é possível obter a distância (ou tempo de deslocamento) entre dois pontos ou endereços, utilizando informações de logradouros. O *Google* disponibiliza este Web service o qual gera um arquivo do tipo XML com informações de origem e destino, cálculo da distância entre os

pontos e tempo de chegada, desde que seja dado o meio de transporte utilizado (bicicleta, a pé ou veículo)

2.5 Meta-heurísticas e Heurísticas

A maioria dos problemas de localização de facilidades é considerada de difícil solução. No entanto, acrescenta Arakaki *et al* (2009) que nem todos desses problemas pertencem à classe NP-Difícil mas somente alguns que são resolvidos em tempo exponencial. Deste modo, métodos exatos podem gastar um tempo computacional considerado muito alto para resolver problemas dessa classe, quando a entrada de dados for muito grande. A solução ótima pode até ser encontrada, mas somente após um grande esforço computacional.

Neste sentido, para resolver Problemas de Localização de Máxima Cobertura justifica-se o emprego de heurísticas e meta-heurísticas que são algoritmos de métodos aproximados implementados para encontrar a solução de problemas de otimização combinatória NP-Difícil. Com esses métodos aproximados é possível obter soluções de boa qualidade, próximas da solução ótima do problema. Porém, nada garante que vão produzir uma solução ótima, porque não são testadas todas as possibilidades (soluções do problema) já que a verificação de todas as soluções é extremamente ineficiente e lenta (RESENDE e WERNECK, 2006; MLADENOVIC *et al*, 2007 *apud* SANTOS *et al*, 2012).

2.5.1 Heurísticas

O nome heurística é derivada da palavra grega *heuriskien*, que significa achar, descobrir. Esse termo é usado para descrever um método intuitivo, inspirado na experiência ou julgamento, o qual procura uma boa solução a um custo computacional aceitável. No entanto, uma heurística não tem capacidade de garantir a otimalidade da solução encontrada. O desafio portanto é produzir, em tempo reduzido, soluções tão próximas quanto possível da solução ótima.

As heurísticas são algoritmos implementados para construir e melhorar soluções de um problema de otimização, podendo ser respostas para duas questões críticas:

- Como construir uma boa solução para o problema?
- Como melhorar (refinar) a solução recém construída? Porque embora se tenha construído uma solução, não significa que essa seja uma boa solução, ela pode ser melhorada.

Elas são classificadas, conforme o emprego, em dois tipos: heurísticas de construção (ou construtivas) e heurísticas de refinamento.

2.5.1.1 Heurísticas construtivas

Esses algoritmos tem como objetivo construir uma solução, elemento por elemento, a partir dos dados de entrada. Uma solução em problemas de máxima cobertura corresponde a um conjunto de facilidades que poderão atender a demanda. Nas heurísticas construtivas clássicas, geralmente a cada iteração (passo), os elementos candidatos a posicionamento de facilidades são ordenados segundo os critérios de uma função gulosa, depois o melhor elemento do momento é escolhido para ser inserido na solução que está sendo gerada (SOUZA, 2013; GONÇALVES, 2010).

2.5.1.2 Heurística de Refinamento ou Busca Local

Toda solução inicial S_0 (construída ou não por uma heurística) pode ser refinada. De modo que, heurísticas de refinamento existem para melhorar uma solução existente. Também conhecidas de técnicas de busca local ou procedimentos de melhoria local, as heurísticas de refinamento em problemas de otimização consistem em uma família de técnicas baseadas na noção de vizinhança. De acordo com Souza (2013), a busca local faz buscas na vizinhança de uma solução visando melhorá-la, ou seja, tem como objetivo procurar na vizinhança uma solução melhor do que a solução inicial.

Esta classe de heurística tem como ponto de partida uma solução inicial qualquer S_0 e começa a fazer a varredura na vizinhança dessa solução inicial. De modo que, a cada iteração a heurística de refinamento caminha, de vizinho para vizinho da solução inicial, mediante definição adotada para a vizinhança, até chegar a conclusão de que a solução S_0 não pode ser mais melhorada, passando a fazer o refinamento em outra solução S_1 , e assim sucessivamente ($S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow \dots \rightarrow S$), retornando a melhor solução S encontrada naquela varredura.

2.5.2 Espaço de solução

O espaço de todas as soluções possíveis chama-se espaço de soluções ou espaço de pesquisa ou espaço de busca. É um conjunto (finito ou infinito enumerável) que contém todas as soluções viáveis, inclusive a melhor solução do problema que estamos tentando resolver. Soluções viáveis são aquelas soluções que obedecem as restrições do problema e a restrição da não negatividade ($x \geq 0$, restrição trivial). A solução do problema pode ser frequentemente expressa, como o resultado da procura pelo extremo de uma função. Cada ponto do espaço solução representa uma solução viável. Deste modo, dada uma função $f(.)$ conhecida por função objetivo ou função custo, um algoritmo procura encontrar o ponto de mínimo ou máximo dessa função, conforme objetivo do

problema no espaço de busca, porque é em um desses pontos extremos que pode se encontrar a melhor solução ou solução ótima. Na Figura 2.13 visualiza-se um espaço de busca contendo vários pontos extremos que podem ser ótimos locais ou um ótimo global, conforme a função custo adotada.

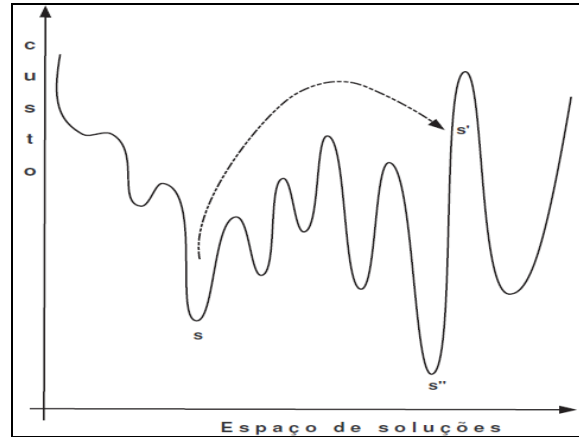


Figura 2.13- Espaço de busca

2.5.3 Noções de Vizinhança

Em problemas de otimização, geralmente os métodos de busca local utilizam técnicas baseadas em vizinhança. Dado uma solução s qualquer do espaço de busca, chama-se de vizinhança da solução s , um conjunto pontos (soluções) considerados próximos àquela solução s . Em uma heurística de refinamento, a definição de vizinhança é crucial para o sucesso da busca local, cujo procedimento passa de uma solução para outra de forma iterativa, percorrendo todo o espaço de solução. De acordo com Santos (2010), "na fase de busca local, o vetor da solução inicial gerado na fase de construção é alterado, de modo que todos os valores dentro da vizinhança sejam usados".

Para formalizar o conceito de vizinhança de uma solução s , denota-se $N(s)$ um conjunto de pontos chamados de vizinhos de s , uma métrica d para retratar a distância entre a solução s e a solução vizinha s' - $d(s, s')$ e um número real ξ para definir a distância crítica aceitável, de modo que se define:

$$N(s) = \{s' \in S / d(s, s') \leq \xi\}$$

Segue a formalização de um problema de otimização. Dado um conjunto S de variáveis discretas s (chamadas de solução), onde S é o espaço de busca (Figura 2.13) de um problema de otimização e $f(.)$ a função objetivo que associa cada solução $s \in S$ a um valor real $f(s)$ que é o custo ou benefício, tal que $f : S \rightarrow R$. Encontrar a melhor solução $s^* \in S$, em um problema de maximização, significa encontrar: $f(s^*) \geq f(s), \forall s \in S$.

Seja $N(s)$ um conjunto de soluções vizinhas da solução s , de modo que a função N associa cada solução s a um subconjunto considerado vizinhança de s $N(s) \subseteq S$, onde: $N(s) = \{ s' \in S / d(s, s') \leq \zeta \}$, com ζ igual a distância definida para cobertura.

4.5.4 Meta-heurísticas

As heurísticas são limitadas e fornecem sempre a mesma solução quando iniciadas de um mesmo ponto de partida. Para suprir essa deficiência das heurísticas surgem as meta-heurísticas com a finalidade de fugir de um ótimo local. Cada meta-heurística usa um determinado tipo de estratégia para evitar um ponto de mínimo ou máximo local, dependendo do objetivo do problema. Exploram um espaço de busca, de forma inteligente, visando encontrar soluções de boa qualidade movendo-se, quando necessário, para áreas ainda não exploradas (HILLIER e LIBERMAN, 2006). Portanto, trata de um método de resolução geral que coordena a interação entre: um procedimento de busca local e a estratégia para criar um processo que seja capaz de escapar dos ótimos locais, assim como, realizar uma busca consistente em uma região de soluções viáveis.

Neste sentido, uma meta-heurística é uma estratégia de busca, não específica para um problema, que tenta explorar com eficiência o espaço de soluções viáveis desse problema. São algoritmos aproximados que incorporam mecanismos para evitar confinamentos em mínimos ou máximos locais, ou seja, foge das armadilhas de mínimos ou máximos locais. A meta-heurística recebe uma solução inicial S_0 e chama uma heurística de refinamento encontrar a melhor solução da vizinhança.

As meta-heurísticas se diferenciam, entre si, basicamente pelo mecanismo adotado para fugir das armadilhas do ótimo local. Neste sentido, de acordo com a estratégia para explorar o espaço de solução S , elas se dividem em duas categorias: busca local e busca populacional. Cita-se como meta-heurísticas de busca local: *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP), *Simulated Annealing* (SA), *Iterated Local Search* (ILS), Busca em Vizinhança Variável (VNS), dentre outras. Exemplos de meta-heurísticas baseadas em busca populacional são Algoritmos genéticos e Colônia de formiga.

Nas meta-heurísticas baseadas em busca local, a exploração do espaço de solução S é feita por meio de movimentos, os quais são aplicados a cada iteração (passo) sobre a solução corrente, gerando uma nova solução promissora em sua vizinhança. Denomina-se movimento a modificação m que transforma uma solução s em outra solução s' que está na vizinhança. Esta operação é definida como: $s' \leftarrow s \oplus m$, onde s' corresponde a melhor solução encontrada após o movimento m , a partir da solução s .

2.5.5 GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*)

A meta-heurística GRASP apresentada por Feo e Resende (1995) é um algoritmo iterativo (*mutistart*), que contempla em cada iteração duas fases distintas: a primeira fase destinada a construção de uma solução viável e a segunda fase de busca local que tem como objetivo de tentar melhorar a solução construída na primeira fase. A fase de construção agrega uma função gulosa juntamente com uma seleção aleatória de elementos candidatos para compor uma solução de boa qualidade a qual será o ponto de partida na fase de refinamento. Uma função gulosa corresponde a função que tem como objetivo avaliar o benefício ou custo (ex. menor distância) de um elemento candidato, de maneira que as soluções iniciais são geradas por algum tipo de construção randômica gulosa. Após a execução de todas as iterações, o procedimento GRASP retorna o resultado final que é a melhor solução encontrada, o que não significa que seja a solução ótima do problema.

2.5.5.1 - Fase de construção

A fase de construção do GRASP também é iterativa. Nessa fase de construção, de acordo com Gonçalves (2008), uma solução (cobertura) viável é gerada, elemento a elemento (conjunto a conjunto), os quais são escolhidos de forma aleatória ou gulosa de uma lista restrita de candidatos (LRC).

Inicialmente, todos os elementos candidatos fazem parte de uma lista de candidatos (LC) da qual são extraídos os melhores elementos para compor a LRC. Para tanto, utiliza-se um fator α de aleatoriedade ($\alpha = [0,1]$) que auxilia na criação da lista restrita de candidatos. É o único parâmetro que deve ser calibrado no GRASP. Deste modo, a LRC gerada será composta por elementos de LC que são escolhidos e avaliados de acordo com o benefício que é associado à inclusão desse elemento na solução parcial. Neste sentido, cada elemento candidato existente na LC é avaliado por uma função gulosa e recebe um valor (peso), conforme o benefício oferecido. Um valor de $\alpha = 0$, faz construir soluções puramente gulosas. Porém com um $\alpha = 1$ são produzidas soluções totalmente aleatórias. Então, quando se pretende usar um α mais guloso do que aleatório, deve-se escolher um α de valor pequeno.

Após a definição da LRC, um elemento t pertencente à LRC é selecionado aleatoriamente para compor a solução. Após a adição do elemento t na solução, o processo continua com a atualização de ambas as listas (LC e LRC). O procedimento de construção é finalizado quando a cardinalidade da lista de candidatos (LC) é igual a zero, ou seja, quando o conjunto da lista de candidatos estiver vazio. Em resumo, depois de criada a Lista Restrita de Candidatos, o algoritmo:

- Escolhe aleatoriamente um elemento t , dentre todos, que fazem parte da LRC

- Depois adiciona na solução parcial esse elemento t escolhido aleatoriamente

Para a escolha do próximo elemento, cada um dos elementos que continuam na LC, porque ainda não escolhidos, são reavaliados novamente pela função gulosa e deste modo, uma nova lista restrita de candidato será criada. Devido a este procedimento, segundo Peres (2007), diz-se que o algoritmo de construção é iterativo, guloso e aleatório. No caso de optar por uma função gulosa, após o procedimento de avaliação do custo, os elementos são ordenados em ordem crescente/decrescente de benefício para um problema de maximização/minimização, segundo a função gulosa.

2.5.5.2 Fase de busca local

A segunda fase do GRASP ou fase de busca local consiste no procedimento destinado a refinar a solução encontrada na primeira fase. Aplica-se um método de busca local para encontrar um ótimo local nas regiões vizinhas da solução inicial, promissoras a encontrar boas soluções.

O diferencial do GRASP é amostrar o espaço de soluções com gerações rápidas de soluções viáveis. Conforme Pozo (2009), para o GRASP quanto melhor for a qualidade da solução gerada na primeira fase, maior será a velocidade para encontrar um ótimo local na fase de busca.

É importante salientar que o GRASP não faz uso de históricos no processo de busca. Isto porque as iterações GRASP são independentes, o que significa que a iteração atual não leva em consideração nenhuma informação das iterações anteriores. Deste modo, a cada nova iteração, as informações anteriores são desprezadas. Mas, é possível armazenar uma ou mais soluções que são as melhores soluções, até o momento. Entretanto, o GRASP é simples, rápido e pode ser integrado com outras técnicas de busca. O critério de parada normalmente utilizado é um número máximo de iterações. Ao final, após todas as iterações, a melhor solução obtida da execução do algoritmo GRASP o resultado é a solução final para o problema.

Os algoritmos a serem utilizados nessa fase de busca local podem ser: algoritmos básicos ou meta-heurísticas mais avançadas, a exemplo de Busca Tabu, SA e GRASP.

2.5.5.3 Algoritmo GRASP

Além da função objetivo $f(\cdot)$, são parâmetros de entradas do algoritmo GRASP: a função gulosa $g(\cdot)$, uma vizinhança $N(\cdot)$ e o número máximo de iterações. Deve-se também definir a instância de entrada de dados.

Na Figura 2.14, visualiza-se um algoritmo GRASP adaptado de Silva *et al* (2006) e Chaves *et al* (2007) para um problema de maximização. Nota-se que os parâmetros de entrada do algoritmo são: a função objetivo, a função gulosa e o número máximo de iterações.

```

Algoritmo GRASP (  $f(\cdot)$ ,  $g(\cdot)$ ,  $N(\cdot)$ ,  $MaxIteracoesGRASP$ ,  $s$  )
1  CarregaInstancia de Entrada ( );
2   $f^* \leftarrow 0$  // função objetivo começa com valor zero
3  para ( ITER = 1 até  $MaxIteracoesGRASP$  ) faça
4      ConstroiSolução (  $g(\cdot)$ ,  $\alpha$ ,  $s$  );
5      Fase de busca local (  $f(\cdot)$ ,  $N(\cdot)$ ,  $s$  );
6      AtualizarMelhorSolução ( Solução, Melhor solução );
7          Se (  $f(s) \geq f^*$  ) então
8               $s^* \leftarrow s$ ;
9               $f^* \leftarrow f(s)$ ;
10         Fim-se
11     Fim- AtualizarMelhorSolução (  $s$  )
12 fim-para
13  $s \leftarrow s^*$ 
14 RetornarMelhorSoluçãoEncontrada (  $s$  )
Fim Algoritmo GRASP

```

Figura 2.14 - Algoritmo GRASP proposto

Os procedimentos que acionam as fases de construção e de busca local podem ser vistas na linha 4 e 5 respectivamente. Das linhas 6 a 11, extrai-se os comandos para atualização da melhor solução encontrada, até o momento, para o problema. Como o problema é de maximização, na linha 7, busca-se avaliar se o custo da solução encontrada é maior do que a melhor solução do momento ($f(s) \geq f^*$). Após o número máximo de iterações GRASP, o algoritmo retorna a melhor solução encontrada (linha 14).

2.5.5.3.1 Algoritmo de construção de uma solução

Verifica-se na Figura 2.15 o procedimento para construção de uma solução no GRASP.

```

Procedimento ConstroiSolução (  $g(\cdot)$ ,  $\alpha$ ,  $s$  );
1   $s \leftarrow \emptyset$  // Conjunto inicial é vazio
2  Inicialize o Conjunto C de candidatos LC
3   $\alpha \leftarrow$  DetermineTamanhoDaListaRestritaDeCandidatos
4  //Enquanto uma solução  $s$  não estiver construída (completa)
5  Enquanto (  $C \neq \emptyset$  ) faça
6      //Criar lista restrita de candidatos (LRC)
7       $tmin = \min \{ g(t) / t \in C \}$ ;
8       $tmax = \max \{ g(t) / t \in C \}$ 
9       $LRC = \{ t \in C / g(t) \geq g(tmin) + \alpha ( g(tmax) - g(tmin) ) \}$ 
10      $t \leftarrow$  selecione aleatoriamente um elemento  $t \in LRC$ 
11     //acrescentar o elemento  $t$  a solução  $s$ 
12      $s \leftarrow s \cup \{ t \}$ 
13     // adaptar a função gulosa
14     Atualize o conjunto C de candidatos
15 Fim-enquanto
16 Retorne a solução recém construída  $s$ 
17 Fim_ ConstroiSolução // Fim da fase de construção de uma solução

```

Figura 2.15 - Algoritmo da fase de construção do GRASP

Nesta primeira fase, os parâmetros de entrada são: a função gulosa e o parâmetro de aleatoriedade α utilizado para determinar o tamanho da Lista Restrita de Candidatos (LRC). O valor de α é um ponto muito importante para o desempenho de meta-heurísticas GRASP. Verifica-se na linha 1 que a solução inicial s é um conjunto vazio $\emptyset$, isto significa que nenhuma facilidade foi escolhida. Um *loop* é gerado entre as linhas 6 e 14 para geração da Lista Restrita de Candidatos (LRC), enquanto na lista de candidatos (C) ainda estiver elementos a serem avaliados. Observa-se na linha 9 a presença da função gulosa $g(t)$ a qual avalia cada elemento de C pelo benefício imediato que o mesmo pode oferecer, naquele instante. Respectivamente, $t_{\min}$ e $t_{\max}$ representam o menor e o maior valor encontrado pela função gulosa $g(t)$, até o momento. Um elemento t é selecionado aleatoriamente da LRC (linha 10) para compor a solução s (linha 12). Depois, a lista de candidatos C é atualizada na linha 14. Enfim, a solução s construída pelo algoritmo é retornada (linha 16).

2.4.5.3.2 Algoritmo de busca local

Após a criação da solução inicial na primeira fase, será iniciada a fase de refinamento. Na Figura 2.16 está representado o algoritmo da segunda fase do GRASP. Tem como parâmetros de entrada: a função objetivo $f(\cdot)$, uma vizinhança $N(\cdot)$ e uma solução inicial s . O resultado final do procedimento é exatamente a solução s^* refinada (linha 12).

```

1 Procedimento BuscaLocal (  $f(\cdot)$ ,  $N(\cdot)$ ,  $s$  )
2   MelhorSolução  $S^* \leftarrow$  SoluçãoInicial;
3   Obter a vizinhança  $V$ 
4    $V = \{ s' \in N(s) / f(s') > f(s) \}$  // vizinhança de  $s$ 
5   Enquanto (  $|V| > 0$  ) faça // ou Enquanto percorre a vizinhança  $V$ 
6     //Busca MelhorSolução  $S^*$  de  $V$ 
7     Selecione  $s' \in V$ 
8     Se  $f(s') \geq f(s^*)$  Então
9        $s^* \leftarrow s'$ 
10    Fim Se
11    Fim Enquanto
12    Retorne  $s^*$ 
13 Fim- Procedimento BuscaLocal

```

Figura 2.16 - Algoritmo da fase de Busca local do GRASP

Com base na solução recém construída, o algoritmo GRASP tradicional executa uma busca local para tentar encontrar soluções vizinhas de melhor qualidade ($f(s') > f(s^*)$). Para tanto, na linha 4 é definida a vizinhança da solução inicial s , na qual será realizada uma varredura em busca de uma melhor solução s' para o problema (linhas 5 a 11). Uma solução vizinha s' representa uma solução que difere da solução inicial em poucos elementos.

Neste sentido, a busca local:

- Examina cada solução vizinha s' , através de uma medida de desempenho (custo) definida pela função objetivo $f(s') \rightarrow \mathbb{R}$ (linha 7);
- E através do comando de teste $\text{Se } f(s') \geq f(s^*)$ da linha 8, verifica se alguma solução s' (que faz parte da vizinhança definida por $V = \{ s' \in N(s) / f(s') > f(s) \}$) é melhor do que a solução inicial. A melhor solução obtida até o momento é atualizada na linha 9.

E depois de percorrer toda a vizinhança procurando por alguma solução melhor que a anterior, o procedimento de busca local retorna a melhor solução encontrada na vizinhança durante aquela varredura (linha 12).

Capítulo 3 - ATUAÇÃO OPERACIONAL DA POLÍCIA MILITAR EM JOÃO PESSOA-PB

Todas as instituições policiais, geralmente, criam divisões geoadministrativas que delimitam as áreas geográficas de atuação referente a jurisdição de cada Unidade Operacional. (Curtin, 2010). Comumente, uma cidade é dividida em áreas de comando policial, (tais como Batalhão, Companhia e Distrito) e em áreas de patrulhamento (a exemplo de setores), para emprego do policiamento ostensivo. Para Larson (1978) e Moonen (2005) delimitações espaciais ótimas podem auxiliar na distribuição eficiente de recursos escassos (policiais e viaturas), reduzir o tempo de resposta e economizar dinheiro.

Conforme RESOLUÇÃO Nº 007/2012-GCG, da Polícia Militar da Paraíba, datada de 1º de agosto de 2012, que estabelece a Gestão Operacional de Polícia Preventiva no território paraibano, a capital paraibana, composta por 64 bairros e uma população de aproximadamente 723.515 mil habitantes (Censo IBGE-2010), distribuídos em uma área territorial de 211 quilômetros quadrados) está dividida em duas grandes Áreas de Polícia Preventiva (1ª e 2ª APP), nas quais operacionalmente atuam, respectivamente, os 1º e 5º Batalhões de Polícia Militar (1º e 5º BPM), ver Figura 3.1 abaixo.

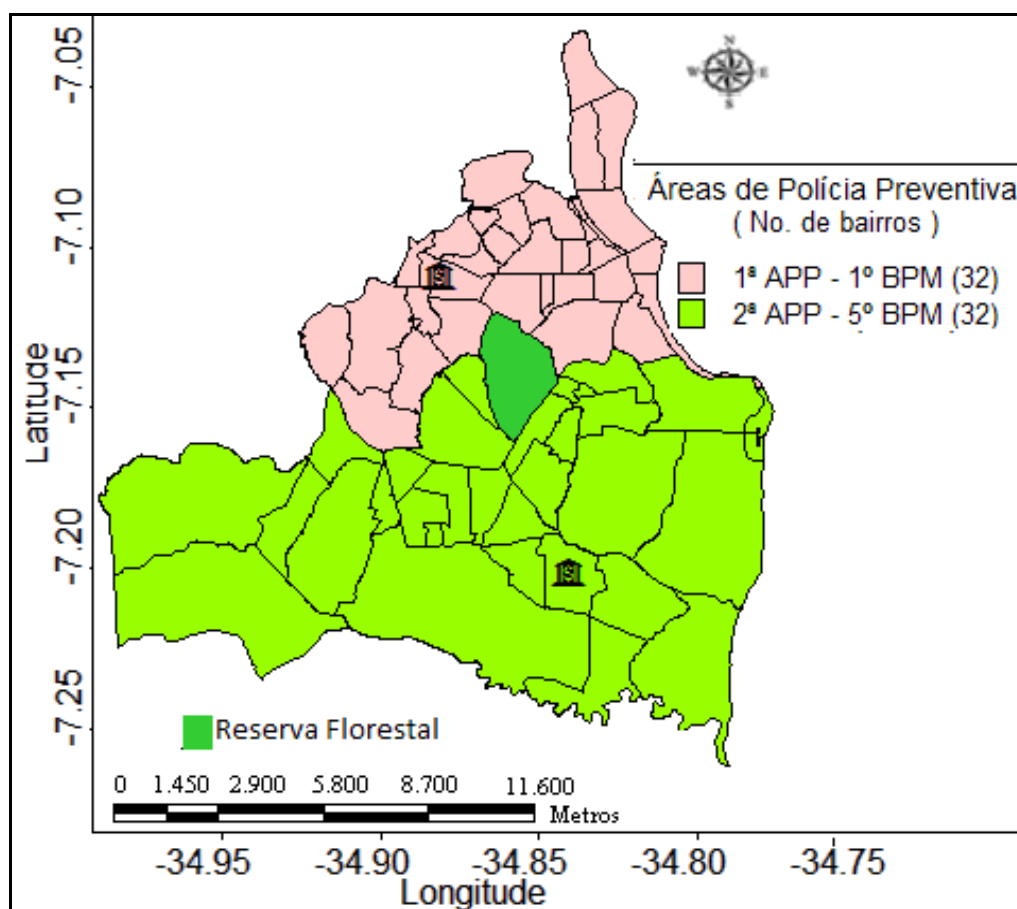


Figura 3.1 - Divisão Operacional de João Pessoa em APP

Verifica-se que a 1ª APP corresponde a zona norte da capital paraibana, enquanto a 2ª APP, representa a zona sul. Cada APP contabiliza 32 bairros, correspondente à jurisdição das respectivas Unidades Operacionais, de forma que o 1º BPM, com sede no Centro, atua operacionalmente em 32 bairros da zona norte e o 5º BPM, com sede no Valentina de Figueiredo, responde por 32 bairros da zona sul. São bairros da área do do 1º BPM: Bessa, Jardim Oceania, Aeroclube, Alto do Céu, Padre Zé, Mandacaru, Ipês, João Agripino, Manaíra, São José, Róger, Treze de Maio, Pedro Gondim, Bairro dos Estados, Brisamar, Tambaú, Varadouro, Tambiá, Centro, Expecionário, Tambauzinho, Miramar, Trincherras, Torre, Castelo Branco, Alto do Mateus, Ilha do Bispo, Jaguaribe, Cabo Branco, Cruz das Armas e Oitizeiro. Por outro lado, cita-se como bairros de atuação do 5º BPM: Altiplano, Cabo Branco, Bancários, Varjão (Rangel), Jardim São Paulo, Anatólia, Portal do Sol, Cristo Redentor, Água Fria, Jardim Cidade Universitária, Ponta dos Seixas, Cidade dos Colibris, Penha, Jardim Veneza, João Paulo II, Ernani Sátiro, José Américo, Mangabeira, Mumbaba, Bairro das Indústrias, Costa e Silva, Funcionários, Ernesto Geisel, Cuiá, Costa do Sol, Distrito Industrial, Grotão, Planalto da Boa Esperança, Valentina de Figueiredo, Mussuré, Gramame, Paratibe, Muçumagro e Barra de Gramame.

3.1 Divisão de áreas operacionais

Para operacionalizar os serviços de policiamento preventivo e ostensivo, nas APP, os dois batalhões contam com as subunidades operacionais exibidas na Figura 3.2.

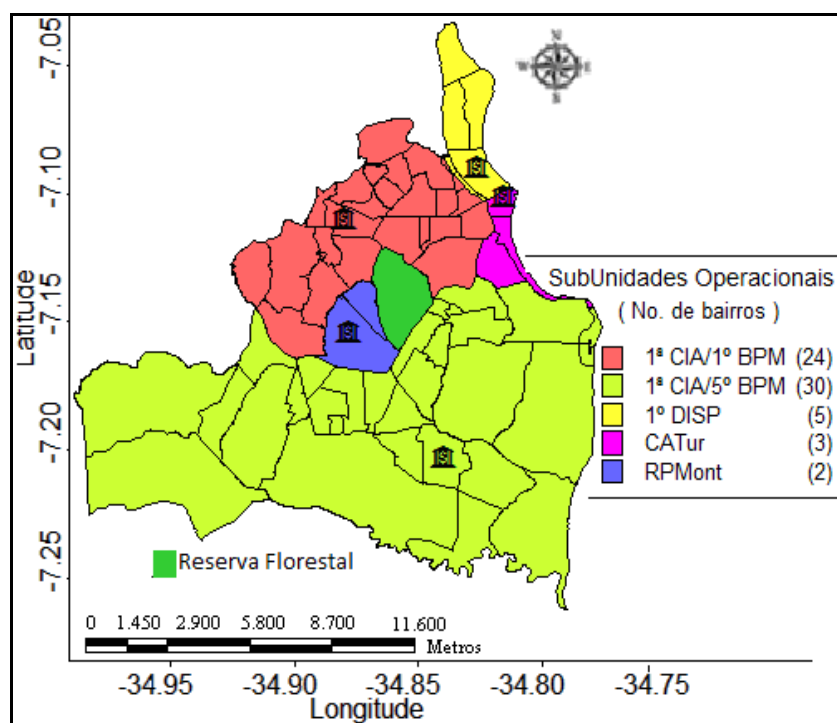


Figura 3.2 - Subunidades Operacionais

Nota-se na Figura 3.2 acima que no espaço geográfico do 1º BPM, atuam três subunidades operacionais: 1ª Companhia de Polícia Militar do 1ºBPM (1ª Cia/1ºBPM), 1º Distrito de Segurança

Pública (1ºDISP) e a Companhia de Apoio ao Turista (CATur). Na jurisdição do 5º BPM, atuam: a 1ª Companhia de Polícia Militar do 5ºBPM (1ª Cia/5ºBPM) e o Regimento de Policiamento Montado (RPMont).

Com sede no Centro da capital paraibana, a 1ª Cia/1ºBPM atua em 24 bairros, a exemplo de: Centro, Jaguaribe, Cruz das Armas, Oitizeiro e Mandacaru. No entanto, Bessa, Manaíra e Bairro São José são bairros policiados pelo (1ºDISP), com sede em Manaíra. A CATur, com sede em Tambaú, se responsabiliza por três bairros: Tambaú, Cabo Branco e Altiplano.

No lado sul de João Pessoa, a 1ª Cia/5ºBPM, com sede no Valentina Figueiredo, é composta por trinta bairros, dentre eles: Bancários, Mangabeira, Valentina e Ernesto Geisel. Enquanto, o RPMont, com sede no Cristo Redentor, responde pelos bairros do Cristo Redentor e Rangel (Varjão).

3.2 Setores Operacionais

Os setores operacionais, compostos por um ou mais bairros, são áreas geográficas de referência para planejamento, distribuição, patrulhamento e acionamento de viaturas operacionais. Na Figura 2, pode se ver os setores do 1ºDISP, da CATur e do RPMont. Com relação às outras duas SubUnidades de Polícia Militar (1ª Cia/1ºBPM e 1ª Cia/5ºBPM), devido a extensão territorial maior, estão subdivididas nos setores operacionais, que constam nas Figuras 3.3 e 3.4.

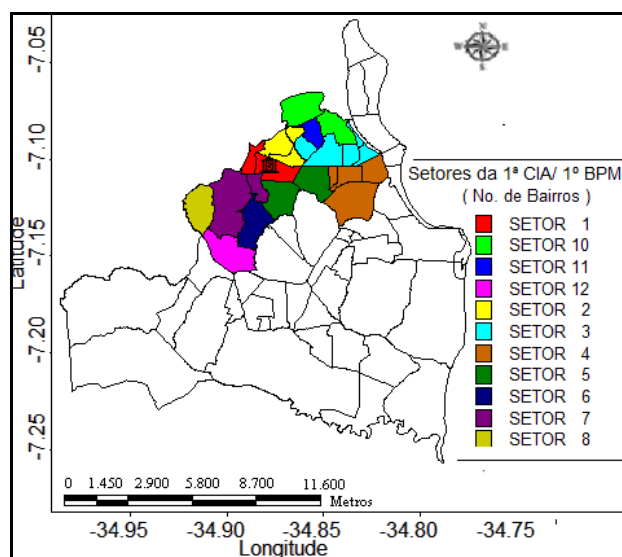


Figura 3.3 - Setores da 1ª Cia/1ºBPM

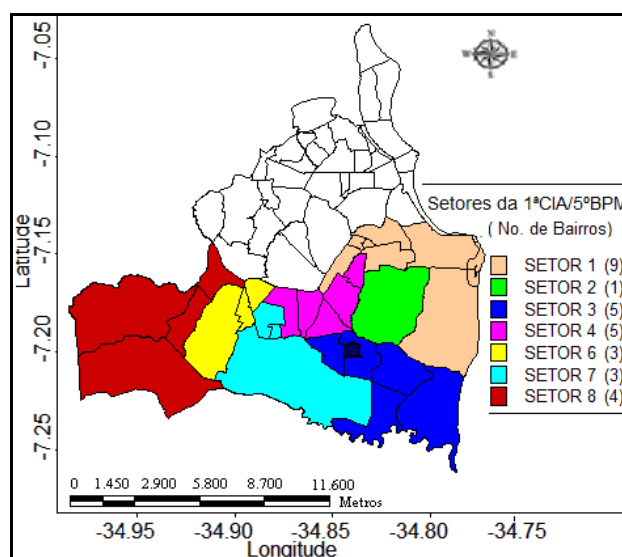


Figura 3.4 - Setores da 1ª Cia/5ºBPM

O Centro e Varadouro fazem parte do setor 1, da 1ª Cia/1ºBPM, enquanto o bairro de Mangabeira sozinho representa o setor 2, da 1ª Cia/5ºBPM. Dessa forma, cada viatura deve atuar na jurisdição do respectivo setor. Para tanto, poderá se posicionar em qualquer lugar dentro do setor, uma vez que não existe uma relação de locais definidos para as guarnições se posicionarem.

Contudo, por determinação do CIOP, conforme a necessidade, uma viatura operacional poderá deixar o setor de origem e se deslocar para outro (setor) com objetivo de apoiar uma ou mais viatura(s) empenhada(s), em ocorrências de maior complexidade.

Diariamente, nos turnos diurno (das 07:00 às 19:00 horas) e noturno (das 19:00 às 07:00 horas), viaturas operacionais são lançadas nesses setores, para exercerem o policiamento ostensivo e preventivo motorizado, assim como, atenderem as solicitações oriundas da população, (que mora ou se encontra em João Pessoa), as quais são registradas, através do serviço público 190 ou iniciativas das guarnições, pelo Centro Integrado de Operações Policiais, instalado no prédio da Secretaria de Segurança e Defesa Social. Para melhor contextualização, foi geoespacializado o quantitativo de viaturas empregadas, no dia 04 de dezembro de 2012, terça-feira, nos turnos diurno (Figura 3.5) e noturno (Figura 3.6). Nota-se que na data foram disponibilizadas 3 veículos oficiais para cobrir o Setor 2 da 1ª Cia/5ºBPM (correspondente ao bairro de Mangabeira), enquanto que para o setor do 1ºDISP foram contabilizadas 5 unidades móveis.

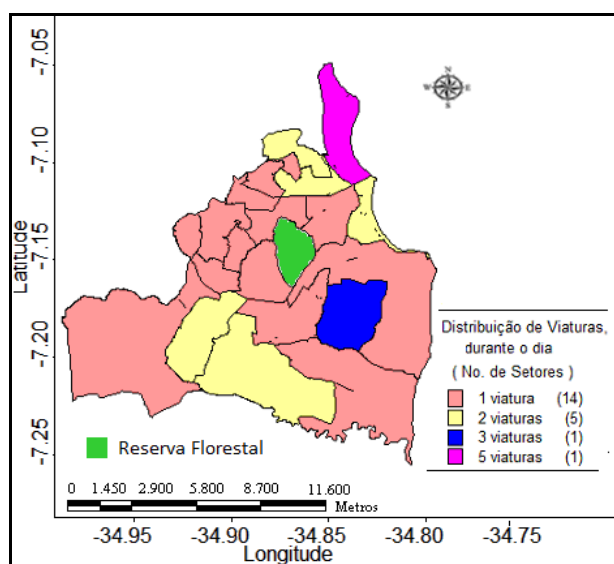


Figura 3.5- Distribuição espacial de viaturas durante um dia

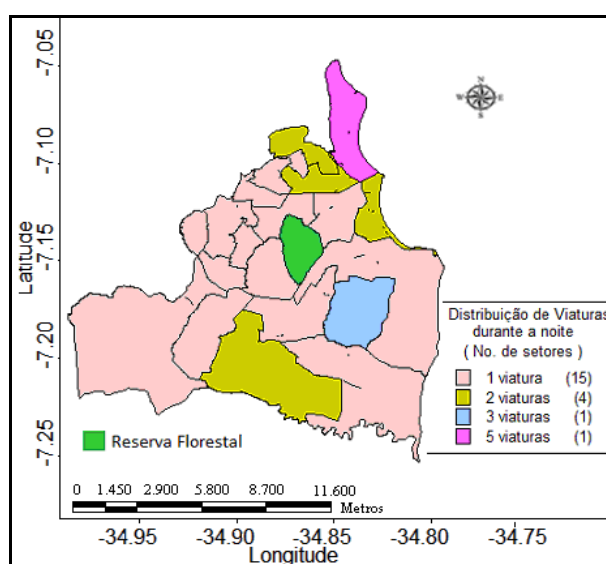


Figura 3.6- Distribuição espacial de viaturas durante a noite

De acordo com Curtin (2010), as forças policiais têm usado técnicas de Pesquisa Operacional, em dois segmentos: o primeiro, focado na definição de áreas destinadas ao patrulhamento e o outro, na distribuição dos recursos operacionais (homens e viaturas) nessas áreas. No caso da Polícia Militar da Paraíba, (como visto nas Figuras 3.3 e 3.4) já existe a delimitação dos setores operacionais, os quais serão obedecidos. Sendo assim, este estudo se concentra apenas na distribuição de viaturas operacionais na cidade, visando identificar os melhores locais para posicionar essas unidades móveis.

3.3 Operacionalização do serviço de atendimento de ocorrências

Viaturas, diariamente, são lançadas nos respectivos setores para atender às ocorrências registradas naquele espaço geográfico. No momento em que assume o serviço, toda guarnição do radiopatrulhamento fica subordinada operacionalmente ao Centro Integrado de Operações Policiais (CIOP) localizado na Secretaria de Segurança e Defesa Social, no bairro de Mangabeira. O CIOP integra serviços emergenciais das Polícia Militar, Polícia Civil e Corpo de Bombeiros para dar celeridade aos atendimentos emergenciais, buscando gerar uma solução eficaz e eficiente, conforme Figura 3.7

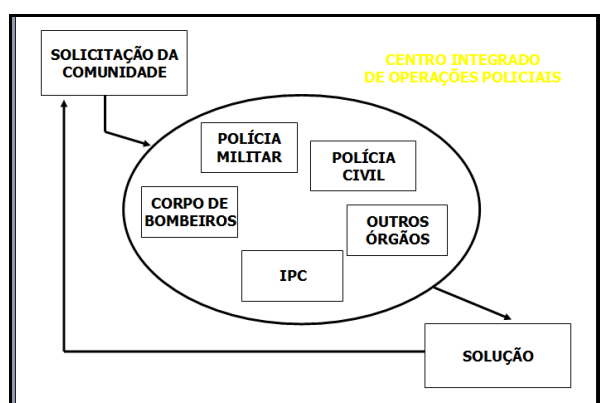


Figura 3.7: Estrutura operacional do CIOP

No tocante a Polícia Militar, o CIOP é o órgão responsável pelo atendimento, através do serviço público emergencial 190, das chamadas oriundas população que mora ou se encontra em João Pessoa e região metropolitana da capital paraibana. Para operacionalizar o serviço de cadastro das ocorrência emergenciais e acionamento de viaturas, o CIOP conta com os setores de teleatendimento, de despacho de viaturas e coordenação operacional. Diante da solicitação do cidadão, o telefonista gera uma ficha a qual automaticamente é repassada para o operador de rádio (policial responsável pelo despacho), o qual tem o papel de acionar a viatura do setor ou uma outra que estiver desempenhada da área (Figura 3.8).



Figura 3.8 - Atendimento de chamadas e despachos de viaturas no CIOP

Para tanto, o cadastro das ocorrências, despacho de viaturas e acompanhamento do atendimento policial é feito através de um Sistema Computacional desenvolvido pela Polícia Militar. De maneira que, a telefonista utiliza a interface da Figura 3.9 para registrar endereço, ponto de referência, relato da ocorrência e dados do solicitante (nome e telefone para contato).

Figura 3.9 - Tela para cadastro de ocorrências no CIOP

Quando a ocorrência é gerada, o sistema automaticamente atualiza a interface da Figura 3.10 destinada ao operador da área, o qual com base nos dados digitados despacha uma ou mais viaturas (dependendo da situação) e acompanha o desenrolar da ocorrência até o desfecho final. Nota-se na Figura 3.10, a existência de três ocorrências na tela: Roubo em Estabelecimento com *status* de pendente, Escolta de Pessoas para a qual foi despachada a viatura Pálio Weekend de prefixo 5266, e Porte Ilegal de Arma na qual a viatura despachada de prefixo 5136 já está no local registrado. Uma ocorrência fica pendente, enquanto não for despachada pelo operador de rádio. A falta de viaturas é o principal motivo para que uma ocorrência fique pendente, na fila de espera, aguardando que uma viatura fique desempenhada para ser acionada.

Ocorrências				
Ocorrência	Bairro / Natureza		Viatura	Operações
1283755 16/05/2013 13:02:30	CENTRO / ROUBO EM ESTABELECIMENTO		PENDENTE	  
1283752 16/05/2013 12:53:40	MARES / ESCOLTA DE PESSOAS		PM 5266 PALIO WEEKEND DESPACHADA	  
1283725 16/05/2013 10:59:51	MANDACARU / PORTE ILEGAL DE ARMA		PM 5136 PALIO WEEKEND NO_LOCAL	  
Detalhes da Ocorrência 1283755				
Dados do Solicitante				
Nome GIVANILSON			Telefone 88090860	
Dados da Ocorrência				
Endereço AV JOAO MACHADO	Complemento SN	Bairro CENTRO	Cidade JOAO PESSOA	Telefone
Referência NO POSTO IPIRANGA DESATIVADO.				
Relato SOLICITANTE INFORMA QUE TEM UM RAPAZ ROUBANDO O POSTO QUE ESTA DESATIVADO.				

Figura 3.10 - Tela para despacho de viaturas e acompanhamento de ocorrências no CIOP

Quando não estão empenhadas em alguma ocorrência, conforme determinação do CIOP, as viaturas podem permanecer parada, em algum lugar do setor, ou efetuar rondas. Localizar viaturas tem sido um procedimento resultante da decisão de comando, determinação do CIOP ou iniciativa da guarnições de serviço.

Capítulo 4 - Modelo de Cobertura para Área de Patrulhas Policiais (PPAC)

Dentre as aplicações de modelos de cobertura citados em Curtin (2010), está a localização integrada de ambulância e viaturas bombeirísticas apresentadas por ReVelle e Snyder (1995). No entanto, Curtin (2010) menciona que até a data da elaboração da pesquisa não havia na literatura nenhuma aplicação do Modelo de Localização de Máxima Cobertura voltada para a determinação de áreas de patrulhas policiais. Neste sentido, diante da escassez de pesquisas com PLMC, na área de segurança pública, Curtin (2010) apresenta um trabalho inovador com o Modelo de Localização de Máxima Cobertura para o posicionamento eficiente de patrulhas policiais, o qual foi testado com dados de crimes registrados pelo Departamento de Polícia da cidade de Dalas, no Texas-EUA. Sendo assim, o modelo de otimização desenvolvido permite que áreas de patrulhas policiais sejam designadas com base nos objetivos de máxima cobertura e máxima cobertura adicional (*backup*). Busca-se, com a implementação do modelo, reduzir custos e diminuir o tempo de resposta da Polícia de Dalas, mediante distribuição espacial eficiente das viaturas. Isto porque, no contexto apresentado por Curtin (2010), a aplicação de modelos de cobertura pode resultar economias em termos de custo de operações (como os custos de combustível) e na redução dos tempos de resposta devido aos eficientes arranjos espaciais.

Intitulado *The Police Patrol Area Covering* (PPAC), o modelo proposto por Curtin *et al*, (2010) para identificar áreas de patrulhas ótimas foi inspirado nos modelos de máxima cobertura e adaptado para a realidade policial. Tem como objetivo identificar um conjunto de centros de comando ou áreas de patrulhas que poderão atender incidentes policiais, dentro do tempo de resposta aceitável, levando em consideração a prioridade da ocorrência e a cobertura *backup*.

4.1 Formulação matemática do PPAC

Para o modelo proposto, Curtin *et al* (2010) definiram três variáveis de decisão binária (x_j , y_i e w_i) as quais representam: a decisão de posicionar uma patrulha em um determinado ponto candidato j (x_j) e a decisão de cobertura a um incidente i (y_i e w_i). A notação dos dados de entradas e das variáveis de decisão empregadas no PPAC são apresentados a seguir:

São dados de entrada:

- I, i é o conjunto e índice, respectivamente, de ocorrências ou chamadas ao serviço emergencial, ou seja, é o conjunto que representa a demanda, de modo que, $I = \{ \text{conjunto de ocorrências } i / i = 1, 2, \dots, m \}$;
- m representa a quantidade ocorrências a serem cobertas (atendidas);

- J, j é o conjunto e índice, respectivamente, de pontos candidatos nos quais podem ser posicionadas patrulhas de polícia, ou seja, $J = \{ \text{conjunto de locais candidatos } j / j = 1, 2, \dots, n \}$;
- n representa a quantidade de possíveis pontos candidatos ao posicionamento de facilidades (viaturas);
- a_i representa o peso ou prioridade do incidente i ;
- P representa a quantidade máxima de patrulhas policiais a serem posicionadas nos pontos candidatos eleitos a posicionamento das viaturas
- S representa a distância de cobertura aceitável para o serviço (pode ser substituída por tempo de resposta)
- d_{ij} é a menor distância entre o incidente i e o centro de comando j
- $N_i = \{j \in J \mid d_{ij} \leq S\}$, conjunto de facilidades (viaturas) que podem atender à ocorrência i , dentro da distância S . Convenciona-se $n_{ij} = 1$, se a ocorrência i estiver coberta por uma viatura posicionada no local candidato j ($j \in J$) a menos da distância de cobertura aceitável S . Caso contrário, $n_{ij} = 0$
- $N_j = \{i \in I \mid d_{ij} \leq S\}$, conjunto de todos os locais de ocorrências que podem ser atendidos a partir de um ponto candidato j . Para cada ponto candidato j existe um conjunto N_j .
- M_j representa a quantidade máxima de ocorrências (limitação de capacidade) que uma patrulha centrada no ponto candidato j poderá atender.
- a_i representa o peso ou prioridade do crime i
- P representa o número máximo de viaturas a serem posicionadas nos pontos candidatos a posicionamento de patrulhas policiais

Tem-se como variáveis de decisão:

- $x_j = 1$, a variável de localização x_j indicará se uma patrulha policial será posicionada no local candidato de posição j ou não, caso contrário 0
- $y_i = 1$, a variável de cobertura y_i indicará se a ocorrência da posição i for atendida ou não, ou seja, se a ocorrência estiver coberta por, pelo menos uma patrulha, caso contrário 0
- w_i - variável de decisão definida de forma semelhante ao y_i na formulação de máxima cobertura. Foi definida em uma restrição para imitar a função objetivo original de máxima cobertura.

Enfim, a formulação proposta por Curtin *et al* (2010) para o problema de posicionamento de patrulhas em centros de comando foi a seguinte:

$$\text{Maximize } Z = \sum_{i \in I} a_i y_i \quad (4.1)$$

$$\text{S a} \quad \sum_{j \in N_i} x_j \geq y_i \quad \forall i \in I \quad (4.2)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = P \quad (4.3)$$

$$y_i \in \{0, 1, \dots, P-1, P\} \quad \forall i \in I \quad (4.4) \text{ (Para cobertura backup)}$$

$$\sum_{i=1}^n a_i w_i \geq O \quad (4.5) \text{ (Trata o tradeoff)}$$

$$\sum_{i \in N_j} a_i x_j \leq M_j \quad \forall j \in J \quad (4.6) \text{ (Para capacitar o modelo)}$$

$$x_j = \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (4.7)$$

$$y_i = \{0, 1\} \quad \forall i \in I \quad (4.8)$$

Na formulação do modelo PPAC apresentada acima, N_i corresponde ao conjunto de centros de despacho ou conjunto de pontos candidatos eleitos para fornecer a cobertura do incidente localizado em i . No contexto de áreas de patrulhas, em outras palavras, N_i é o conjunto de centros de comando ou centros de áreas de patrulhas que poderão atender ao incidente i , dentro do tempo de resposta aceitável S . Verifica-se que no modelo PPAC, o tempo de resposta aceitável S pode variar conforme os diferentes tipos de incidentes ou diferentes prioridades. É preciso notar ainda que, embora d_{ij} e S não aparecem diretamente na formulação do modelo, eles são inseridos nas restrições (4.2) através da inclusão do conjunto N_i que contém todas as facilidades j cuja distância d_{ij} , dessa facilidade j a uma ocorrência i , seja menor ou igual a medida de cobertura S . O objetivo do modelo PPAC é maximizar o número de incidentes ponderados, atendidos ou cobertos, dentro do tempo de resposta aceitável. Além do mais, extrai-se que qualquer subconjunto de incidentes de crime pode ser usado para preencher o conjunto I . Neste sentido, para exemplificar, Curtin (2010) reforça que se existirem tendências sazonais de incidência de ocorrências, pode ser apropriado, quando for definir áreas de patrulha para uma dada semana (ou mês), considerar apenas aqueles incidentes que ocorreram durante a mesma semana (ou mês) do ano anterior.

Ainda se observa na formulação apresentada para o modelo PPAC, que a função objetivo (4.1) maximiza a demanda (ocorrências) total coberta. Busca-se, pois maximizar N_i centros de despachos eleitos para dar cobertura à ocorrência i .

As restrições (4.2) permitem que y_i seja igual a 1, somente quando 1 ou mais viaturas de polícia estiverem posicionadas em locais candidatos do conjunto N_i . O número de viaturas para distribuir nas áreas de patrulhamento (P) é definido pelo usuário e poderia, por exemplo, limitar o número de viaturas disponíveis. Este limite é imposto pela restrição (4.3), a qual restringe a P o número de viaturas na solução. Enfim, as restrições (4.7) e (4.8) definem a natureza binária das variáveis de decisão, desta forma, exigem que somente valores inteiros sejam incluídos na solução. Isto porque, na prática uma viatura não pode ser dividida para atender áreas diferentes, ao mesmo tempo.

Dado o limite de recursos da polícia, a implementação do PPAC também requer que o número de patrulhas policiais seja conhecido com antecedência. Este é, de fato, um dos pontos fortes apontado por Curtin (2010) para o modelo, tendo em vista que sabendo que o montante financeiro a ser empregado para recursos policiais pode mudar rapidamente e muitas vezes, é possível prever que mudanças ocorrerão no formato de alocação das viaturas.

Além do mais, o modelo PPAC assume que um nível de serviço aceitável (tempo de resposta) tem que concordar com um nível de segurança aceitável pela população. Sendo assim, sugere-se avaliar o tempo de resposta que pode ser determinante na qualidade da prestação de serviço da polícia, conforme cada realidade. Para tanto, é importante que a administração da polícia registre sempre informações sobre a largura da rua, limite de velocidade, tempos de deslocamento, condições de tempo, qualidade das ruas, congestionamento, dentre outras, porque elas fazem parte da lista de fatores que influenciam o tempo de resposta, o qual está altamente correlacionada com a distância percorrida para o atendimento. Neste sentido, para Sherman *et al* (2004 *apud* Curtin *et al*, 2010), pesquisas têm mostrado que os tempos de resposta têm pouca influência sobre o volume de crime em uma jurisdição. Além do mais, os departamentos de polícia estão sujeitos a um conjunto de limitações de recursos (humanos e materiais), envolvidas em realidades políticas que cobram e enfatizam que a prestação eficiente de serviços é muito importante para a população (BODILY, 1978; GREEN e KOLESAR, 1984; PRIEST e CARTER, 1999; CURTIN, 2010).

4.2 Operacionalização do Modelo PPAC

Para o modelo, considerou os próprios incidentes registrados para representarem o conjunto de localizações i que devem ser atendidas. Neste contexto, visando a máxima cobertura,

para cada ocorrência i foi definido um peso com base o nível de gravidade do incidente. Foram considerados incidentes menos graves: vandalismo, acidentes de carros, dentre outros. Já homicídios e roubo a mão armada foram tidos como crimes mais graves. Para o estudo, Curtin *et al* (2010) considerou 2 distâncias de coberturas S diferentes (1 e 2 milhas), levando em consideração opinião de policiais, assim como o tamanho das 6 divisões territoriais da Cidade de Dallas para a Polícia. Isto porque, segundo Hill (2006, apud Curtin, 2010) não existe um valor único, considerável mais aceitável, para distância de cobertura e tempo de atendimento para o serviço policial. Existem, de fato, muitas medidas subjetivas e objetivas de prestação de serviços de polícia (BROWN e COULTER, 1983 apud CURTIN, 2010), e o tempo de resposta é apenas um de muitos parâmetros de comparação. Além do mais, segundo Curtin (2010), não existe uma regra para definir tempos de resposta aceitáveis porque esses são variáveis dependentes do contexto, (natureza do incidente, recursos policiais disponíveis e equidade de prestação de serviços, dentre outros).

Na pesquisa, Curtin (2010) empregou uma inovadora combinação de técnicas de análises espaciais contidas em um Sistema de Informação Geográfico (SIG) e formulações de modelos matemáticos com enfoque na máxima cobertura para determinar as áreas ideais de patrulha da polícia. O uso do SIG foi para visualização dos incidentes, das soluções apontadas e da distribuição espacial das áreas de atuação da polícia. Na Figura 4.1 verifica-se a delimitação geográfica das áreas de atuação da polícia, na cidade de Dalas, em três níveis de jurisdição a saber: divisões, setores e *beats*.

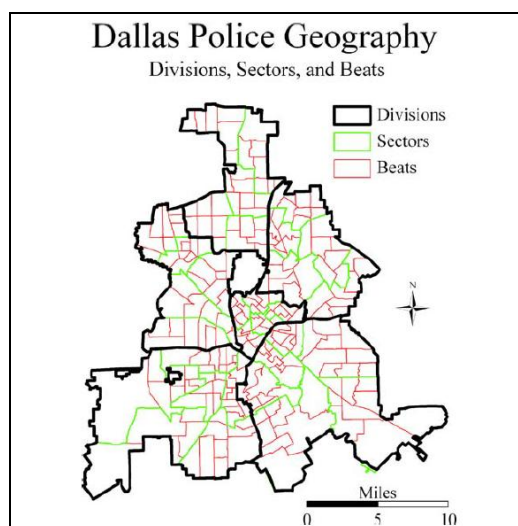


Figura 4.1 - Distribuição espacial da jurisdição da Polícia de Dalas

Ao longo da pesquisa, foram gerados arranjos ótimos alternativos, em três níveis, da distribuição espacial. Dentre os resultados obtidos para o melhor arranjo de setores e *beats*, dentro da cada uma das divisões da Polícia de Dalas, exibe-se na Figura 4.2 o limite da Divisão Central Norte com setores, *beats* e os 267 locais de chamadas para a força policial no dia 20/07/2000. Para

Curtin (2010), embora não haja uma preocupação com a precisão da informação contida no endereço registrado pela Polícia, sugere que a melhor representação espacial disponível para os incidentes seja a geocodificação dos endereços.

Com ajuda do SIG e endereços disponíveis, foi possível a geração da origem-destino (OD), a qual faz parte do processo necessário para resolver o problema PPAC. Para tanto, a matriz de origem-destino (OD) foi gerada com base em um algoritmo de caminho mais curto de todos-para-todos. Já o conjunto de centros de despacho eleitos N_i foi gerado através da utilização de uma seleção personalizada e interface de consulta. Com apoio de um SIG, foram calculadas as distâncias entre os incidentes e as facilidades que poderão cobri-los. O resultado deste processo é traduzido na Figura 4.3, na qual são exibidas as distâncias mais curtas de um simples incidente para todos os respectivos locais de centros de comando potenciais. Visualiza-se ainda em destaque, os caminhos para as duas facilidades que estão dentro da distância de cobertura S . Este processo foi repetido para cada um dos 267 locais de incidente, a fim de gerar o conjunto N_i (centros de despachos).

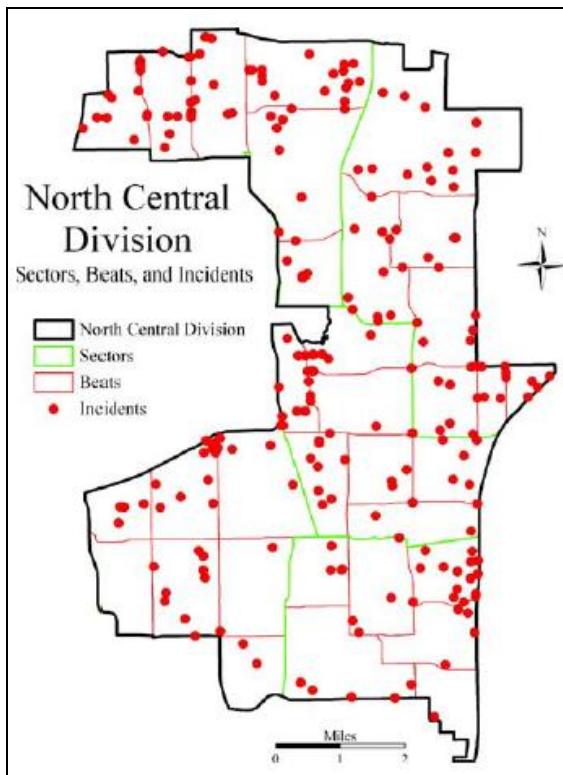


Figura 4.2 - Setores, beats e incidentes da Divisão Central Norte

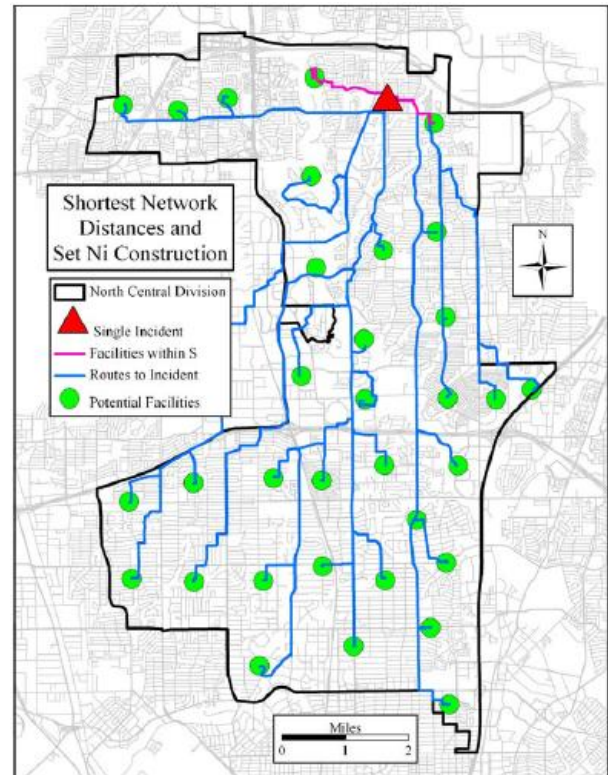


Figura 4.3 - Menores distâncias da rede e construção do conjunto N_i

A Matriz de origem-destino é uma das informações indispensáveis para resolver o problema PPAC. Sendo assim, após ser gerada, a matriz OD foi exportada para o solver de programação linear inteira. Além da matriz OD, são dados necessários para encontrar a solução ótima: o número de locais candidatos a instalação da facilidade, o número de posições de incidentes, os

valores do peso para cada incidente (a_i) e o conjunto de centros de despacho N_i . A solução ótima foi gerada usando o software de Linguagem de Programação para Otimização voltado à aplicações de programação inteira - o ILOG e o CPLEX 8.1. Este último software combina o uso da versão do Método Simplex (DANTZIG, 1957) e a técnica para relaxação linear Branch and Bound (Hillier and Lieberman, 1995 *apud* Curtin, 2010).

Na aplicação apontada por Curtin (2010), a solução ótima consiste em 5 posições (centróides de *beat*) que melhor servem para cobrir os incidentes ponderados na Divisão do Centro-Norte. Na Figura 4.4, é possível ver as cinco posições ótimas e as rotas para os incidentes que provavelmente serão cobertos pelas facilidades situadas nesses locais ótimos.

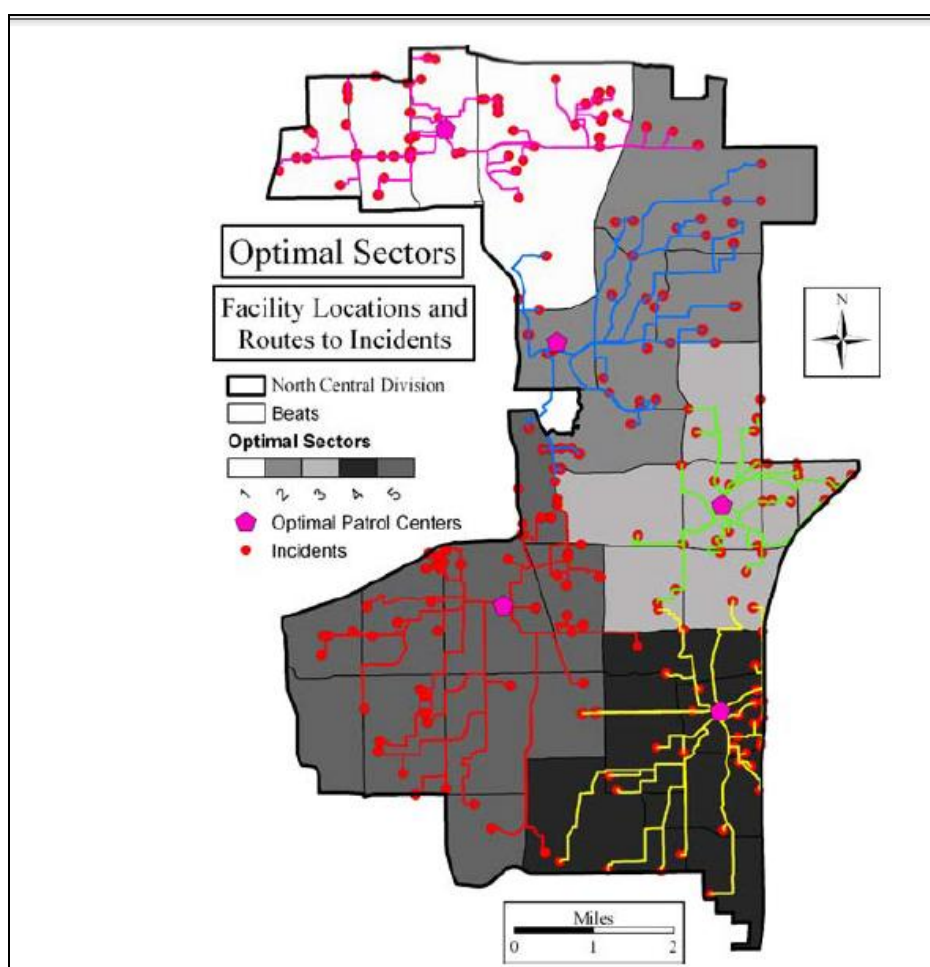


Figura 4.4 - Setores e rotas ótimas para incidentes

Foi empregado um procedimento simples para associar *beats* a novos setores com base nos incidentes que deverão ser cobertos por cada localização ótima da facilidade, de tal maneira que a geografia hierárquica da polícia ficou preservada. Essa necessidade de preservar a geografia hierárquica contribuiu para que *beats* fossem associados a um setor, porém alguns incidentes registrados dentro de um determinado *beat* ficaram mais próximos a um centro de comando do

setor vizinho e não do setor que pertence o *beat*. Este fato pode ser visto na Figura 4.4, na qual também são exibidas as rotas para os incidentes que cruzam os limites dos respectivos setores. Para Curtin (2010), redesenhar os limites do *beat*, em caso de necessidade, trata de uma questão a ser discutível com os gestores, na busca de jurisdições melhores. Ainda de acordo com Curtin (2010), através da geração da solução ótima, é possível comparar o nível de serviço com o arranjo dos setores existentes. Talvez mais importante do que observar a área total de patrulha resultantes das soluções ótimas, seja cobrir substancialmente mais incidentes dentro da prevista distância de cobertura S .

Os resultados obtidos por Curtin (2010) mostraram notáveis melhorias na capacidade da polícia para responder às chamadas emergenciais. Registrou-se uma redução de quase 19% na distância total percorrida por policiais, que pode ajudar em melhorar drasticamente os tempos de resposta e reduzir os custos (principalmente os custos de combustível). É de suma importância que os gestores de polícia tomem conhecimento da magnitude destes tipos de melhorias na eficiência do serviço, visando mais rapidez no atendimento e ajustes de procedimentos operacionais. As chamadas emergenciais oriundas de um só dia foram utilizadas na demonstração prática acima, e essa análise seria apropriado sob condições em que um evento significativo ocorreu naquele dia, como uma catástrofe natural ou provocada pelo homem, ou uma em um único dia emergência pessoal (a paralisação ou greve).

Assim como é habitual em muitos modelos de localização, também são feitas suposições dentro PPAC sobre a localização das patrulhas policiais e o dos pontos candidatos (centros de comandos). Curtin (2010) considera cada centro de comando, muitas vezes chamado de divisão ou setor sede, como o local onde são tomadas as decisões administrativas sobre padrões de criminalidade na área de cobertura. Por outro lado, em termos de áreas de patrulha, essa localização central corresponde ao lugar de onde as viaturas de patrulha da polícia são mais propensos a serem despachadas. Embora, certamente tenha o caso em que às vezes, patrulheiros respondem à chamadas enquanto eles estão em atividade de patrulhamento (a exemplo de rondas preventivas) nas designadas áreas de atuação. Deste modo, Curtin (2010) reforça que não há nenhuma maneira de saber, com antecedência, o local exato a fim de determinar a cobertura precisa dos veículos de patrulha. Sob estas circunstâncias, a localização da central torna-se a melhor hipótese de posicionamento da viatura dentro da área de patrulha. Embora se possa selecionar os locais aleatórios dentro de áreas para simular a natureza probabilística dos locais para posicionar as viaturas de polícia, nenhuma medida espacial de tendência central destes locais escolhidos aleatoriamente iria convergir para um centro, a exemplo do centróide de um polígono.

4.3 Modelo de Cobertura *backup*

O Modelo de Localização com cobertura *backup* (adicional) foi empregado na pesquisa de Curtin (2010) para atender um incidente quando a patrulha do *beat* estiver empenhada. Além do mais, dependendo da prioridade do incidente e da natureza da ocorrência, a polícia pode empregar mais de uma viatura para o atendimento da ocorrência emergencial. Deste modo, haverá situações em que mais de uma viatura poderão ser despachadas para atender uma mesma ocorrência, surgindo portanto, a noção de cobertura múltipla. Em Curtin (2010), o conceito de cobertura múltipla está associada a cobertura adicional (*backup*, de apoio), cujo termo é conhecido nas unidades policiais.

Para aproximar o modelo PPAC, ainda mais, da realidade policial, Curtin (2010) acrescenta o conceito de cobertura *backup* na formulação do problema. Neste sentido, o modelo pode ser refeito, substituindo as restrições (4.3), por novas restrições (4.4).

$$y_i \in \{0, 1, \dots, P-1, P\} \text{ para todo } i \in I \quad (4.4)$$

Onde:

- P corresponde a um número fixo de viaturas, previamente definido, que representa a quantidade máxima de facilidades que o gestor dispõe, naquele momento, para posicionar nos pontos candidatos eleitos a posicionamento de patrulhas policiais.

Com as restrições (4.4), permite-se que a variável binária de cobertura y_i assumam valores inteiros de 0 a P , deixando assim de assumir apenas 0 ou 1, conforme definição na restrição (4.8).

Desde que na função objetivo existe um somatório da variável binária de cobertura y_i , então a inclusão das restrições (4.4) motiva o uso de máxima cobertura *backup* de incidentes. Além disso, uma vez que os valores de a_i aumentam, à medida que aumentam as chamadas prioritárias, esta formulação variante (4.4) incentiva a cobertura *backup* para as chamadas mais importantes. Para Curtin (2010), o mais importante ainda é que a cobertura *backup* não é um objetivo secundário. Isto porque, cobertura de qualquer tipo representa o objetivo do problema. Por outro lado, cobertura *backup* é mais valiosa por natureza, do que a cobertura individual, porque tende a cobrir o máximo de demanda, mesmo quando uma facilidade estiver empenhada. Para a função objetivo, a n enésima cobertura vale tanto quanto a primeira. Desta maneira, a cobertura *backup* é apenas uma forma mais valiosa de cobertura, não há necessidade de múltiplos de objetivos na formulação do problema PPAC, ou de adição de vários tipos de variáveis de cobertura, ou ainda acrescentar restrições para impor valores dessas variáveis.

Porém, Curtin *et al* (2010) menciona que infelizmente uma solução que incentiva a máxima cobertura com *backup*, sem reforçar a máxima cobertura, tenderá a dar soluções em que as instalações (centros de patrulha) sejam simplesmente agrupamentos em torno dos incidentes mais graves. O pesquisador ainda reforça que é evidente que a solução de cobertura *backup* concentra recursos em demasia em área de alta criminalidade, em detrimento do resto. Segundo Curtin(2010), isto sugere que exista um equilíbrio entre estes dois objetivos.

4.4 Tratando *tradeoff*

No modelo PPAC existem dois objetivos a levar em consideração: máxima cobertura e máxima cobertura *backup*. Sendo assim, verifica-se um *tradeoff* (escolha conflitante) entre estes dois objetivos porque pode-se ganhar empregando um objetivo e perder utilizando o outro. Assim, como cada *tradeoff* pode ser generalizado, Curtin (2010) sugere que primeiro resolva o (problema) objetivo de máxima cobertura, obtendo um limite superior caracterizado como máxima cobertura. Em seguida, o limite obtido de y_i é relaxado para encontrar a cobertura *backup*. Para tanto, um conjunto de variáveis de decisão binárias (w_i) é adicionada apenas quando y_i fizer parte da formulação do modelo de máxima cobertura. Deste modo, para tratar questões de *tradeoff* foram incluídas as restrições (4.5) para imitar a função objetivo do modelo de máxima cobertura.

$$\sum_{i=1}^n a_i w_i \geq O \quad (4.5)$$

Nas restrições (4.5), o parâmetro O é um valor menor ou igual ao limite superior da função objetivo de máxima cobertura. Esta restrição garante que o nível mínimo (O) de cobertura poderá ser forçado pelo gestor. Finalmente, este modelo é resolvido repetidas vezes para um intervalo de valores de O , visando determinar o melhor *tradeoff* existente entre a máxima cobertura adicional e a máxima cobertura pura.

4.5 Capacitação do modelo PPAC

Foi também observado no problema que as ocorrências registradas se diferem entre si, quanto à gravidade e risco que o incidente podem oferecer ao policial durante o atendimento, o que faz com que exista um quantitativo desproporcional de chamadas ponderadas pela prioridade atribuída de acordo com natureza da ocorrência de cada uma delas. Para tratar dessa peculiaridade do problema, Curtin *et al* (2010) acrescentou as restrições (4.6) com a finalidade de forçar uma capacidade de atendimento em relação ao número de chamadas ponderadas, deixando pois o

modelo PPAC capacitado. Segue a formalização da capacitação do modelo com as restrições (4.6) :

$$\sum_{i \in N_j} a_i x_j \leq M_j \text{ para todo } j \in J \quad (4.6)$$

Onde:

- $N_j = \{i \in I \mid d_{ij} \leq S\}$. Consiste no conjunto de todos os incidentes que podem ser atendidos por uma facilidade a partir de um ponto candidato j . Por definição, para cada ponto candidato j existe um conjunto N_j de ocorrências i que serão atendidas pela facilidade posicionada nesse ponto candidato j .
- M_j representa a quantidade máxima de ocorrências (limitação de capacidade) que uma patrulha centrada no ponto candidato j poderá atender.

As restrições (4.6) empregam o conceito de vizinhança de cobertura ao invés de variável binária de cobertura. Neste sentido, o conjunto N_j é definido como todos os locais de incidentes i que podem ser servidos por uma patrulha policial posicionada na área candidata j . Evidencia-se também que há uma restrição para cada área de patrulha candidata j . Verifica-se ainda que as limitações de capacidade são baseadas na variável binária de localização x_j , em vez de serem baseadas nas variáveis binárias de cobertura y_i . O valor de x_j será 1 quando uma patrulha for posicionada no ponto candidato j . Para estes casos, as restrições exigem que a soma dos valores das prioridades a_i de todas as ocorrências i que são cobertas pela facilidade posicionada no local candidato j deve ser menor ou igual à carga máxima de incidentes que uma viatura pode dá assistência.

Capítulo 5 - MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo visa auxiliar os gestores de segurança pública na adoção de políticas para redução e inibição da criminalidade, de forma eficiente e eficaz, com o emprego de viaturas policiais em locais estratégicos. Por isto, na pesquisa levou-se em consideração as ocorrências dos crimes pontuados em Silva *et al* (2013). Primeiramente, buscou-se verificar a existência de *hotspots* de crimes cujo resultado servirá de parâmetro para nortear as decisões na etapa seguinte, que trata da seleção do conjunto de locais candidatos. Com a identificação de *hotspots* visa-se reforçar o posicionamento de viaturas policiais em locais estratégicos, que requerem a presença maior da força policial, devido a grande concentração de crimes. As estratégias adotadas para seleção de locais candidatos foram: decisão do gestor de alto escalão, modelo de *p*-medianas e *k-means*. Para tanto, as etapas adotadas na pesquisa estão sintetizados na Figura 5.1

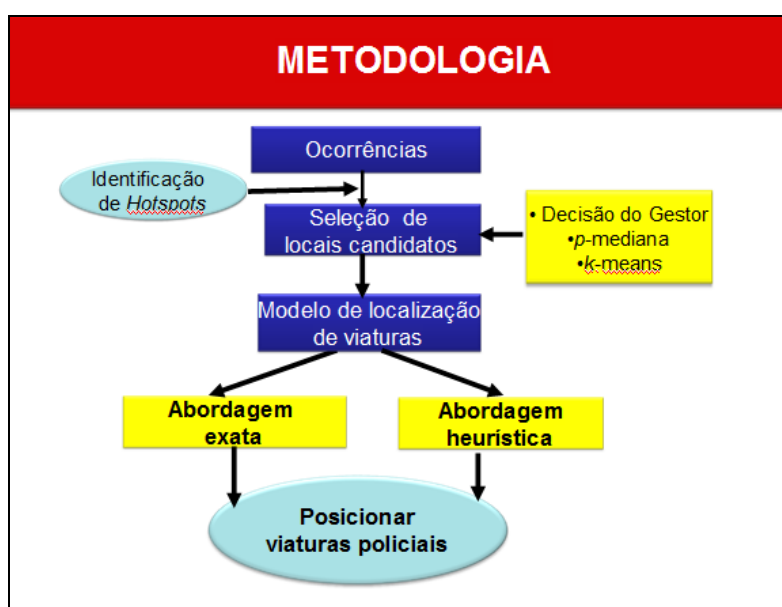


Figura 5.1 - Etapas adotadas na pesquisa

5.1- Registro das ocorrências

O estudo será realizado na cidade de João Pessoa, capital da Paraíba. Os dados utilizados inicialmente correspondem a 1.492 ocorrências de Crimes Contra o Patrimônio, cedidos pela Polícia Militar e registrados nos meses de janeiro e fevereiro de 2013, pelo Centro Integrado de Operações Policiais (CIOP). Na Figura 5.2, visualiza-se a distribuição espacial dessas ocorrências, que dentre os crimes computados, estão: Roubo a Pessoa, Roubo em Transporte Coletivo, Roubo em Posto de Combustível, Furto em residência, Furto de veículos, extorsão, estelionato, dentre outros.

5.1.1 Identificação de *hotspots*

Uma das técnicas utilizadas para o combate da criminalidade tem sido o delineamento das chamadas zonas quentes de criminalidades (*hotspots*) ou áreas com grandes concentrações de crimes (BEATO, 2008). Os *hotspots* são pequenas áreas com intensidades elevadas de criminalidade. Tipicamente, representam cinco por cento ou menos da área de uma cidade, mas que concentram um percentual em torno de 50 por cento ou mais dos crimes (CHAINEY *et al*, 2008; WEISBURD *et al*, 2004; WEISBURD *et al*, 2011). Desta forma, estas zonas quentes devem ser vistas como bons alvos para a prevenção de crimes (GORR *et al*, 2012). Identificar essas áreas pode ajudar a polícia a direcionar os esforços nos locais onde são mais necessários, otimizando desta forma, o efeito da presença da força policial. Além do mais, estudos experimentais, em Braga (2005), têm mostrado considerável redução da criminalidade quando as polícias atuam nessas áreas de criminalidade, direcionando mais recursos operacionais e táticas inovadoras para o enfrentamento ao crime. Identificar *hotspots*, significa encontrar clusters ou aglomerados de crimes, em uma distribuição espacial do fenômeno.

Para verificação de *hotspots* de crimes, utilizou-se o arquivo contendo as coordenadas geográficas das ocorrências de Crimes Contra o Patrimônio da Figura 5.2, o qual foi importado para o SPRING no modelo de dados cadastral. Depois, através do estimador de densidade *Kernel* do SPRING foi gerada a superfície de intensidade, representada na Figura 5.3. Por simples inspeção visual, claramente, é possível identificar a presença de um *hotspot* crônico (GORR *et al*, 2012) de crimes, no Centro da cidade e um outro em menor intensidade, nas proximidades dos bairros Manaíra e Tambaú.

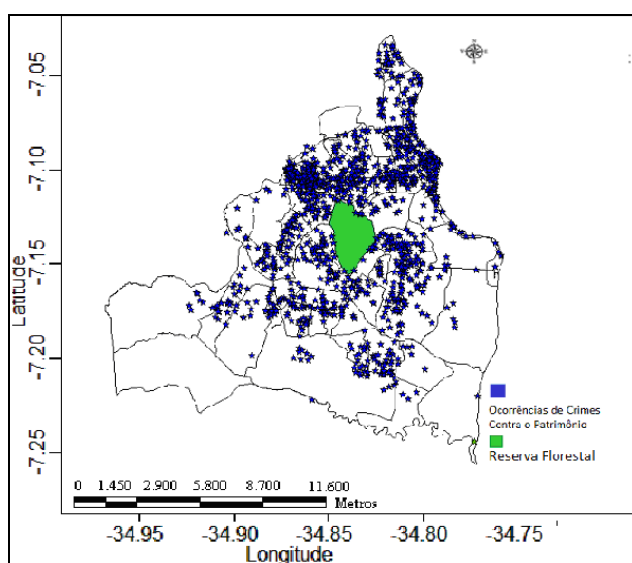


Figura 5.2 - Distribuição espacial de Crimes Contra o Patrimônio

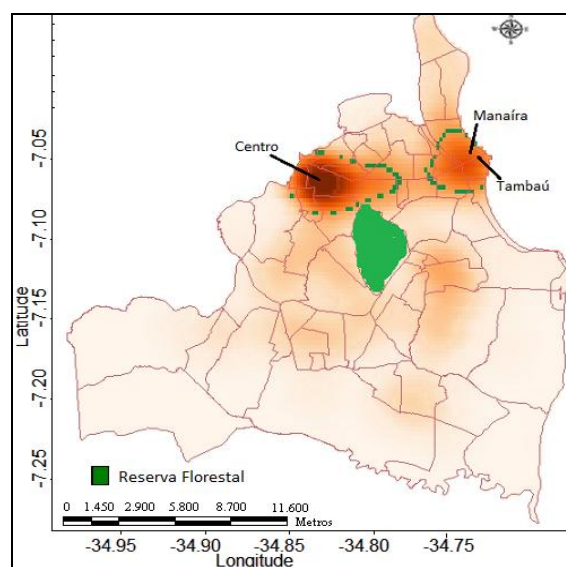


Figura 5.3 - Mapa de Kernel com Hotspots

De acordo com GORR *et al* (2012), registra-se *hotspot* crônico em áreas comerciais nas quais é maior a concentração de pessoas que lá vão, temporariamente, por questões de trabalho ou negócio, mas não moram. Deste modo, o mapa de *kernel* da Figura 5.3 sugere que, dentre os 64 bairros de João Pessoa, o Centro requer a presença de um número maior de viaturas para a prevenção e inibição da incidência de Crimes Contra o Patrimônio naquela região. Assim como, nas proximidades de Manaíra e Tambaú, bairros de concentração maior de turistas e com população de renda mais elevada, quando comparados a outros bairros, a exemplo do Centro.

Como o mapa de *Kernel* não quantifica (Figura 5.3), não resolve o problema, apenas aponta onde o fenômeno apresenta maior concentração, cabendo ao gestor investigar melhor o problema naquela área, adotando medidas táticas e operacionais. Deste modo, após ter noção geral do comportamento do fenômeno criminal na cidade, segue-se para a etapa de eleger locais candidatos, conforme estratégias adotadas.

5.2 Seleção de Locais Candidatos

Considerada fase muito importante para o qualidade do modelo, a seleção de locais candidatos a posicionamento de facilidades é decorrente do emprego de diversas técnicas e métodos. Na pesquisa, as estratégias adotadas para seleção de pontos candidatos foram: decisão do gestor de alto escalão, *p*-medianas e *k-means*. Essas três estratégias foram utilizadas, de forma paralela e complementar, justo porque as soluções apontadas por cada uma delas farão parte do conjunto universo composto por 78 locais candidatos, de modo que cada uma das estratégias irá contribuir com 26 pontos, no modelo proposto para localização de viaturas policiais.

5.2.1 Decisão do gestor de alto escalão

A decisão locacional de viaturas, aprovada pelo Comandante Geral da Polícia Militar, foi traduzida no Plano de Operação intitulado Ponto de Visibilidade Operacional (POVO) que tem como meta a redução em 10% (dez por cento) dos Crimes Violentos Letais Intencionais (CVLI) e de Crimes Violentos Contra o Patrimônio (CVP).

A atividade operacional para implementação do plano POVO se revela no posicionamento de viaturas operacionais em logradouros públicos, considerados pontos de visibilidade operacionais e estratégicos, da cidade de João Pessoa. Dentre os objetivos, considerados prioridade de comando, que influenciaram na escolha dos 26 locais geográficos na capital paraibana para posicionar viaturas operacionais, cita-se: inibição da criminalidade (através da demonstração de força),

proporcionar sensação de segurança em locais de maior movimentação de pessoas e servir de ponto de referência ao cidadão que necessitar dos serviços da Polícia Militar, em eventuais situações de emergência.

De posse da relação dos pontos de visibilidade eleitos pelo gestor (com endereço e ponto de referência), foram geradas as coordenadas geográficas no *Google Maps*. Em seguida, no *MapInfo*, as localidades foram georreferenciadas, gerando-se os 26 pontos de visibilidade operacional (POVO) apontados na Figura 5.4. Verifica-se que a concentração maior de pontos (20), o equivalente a 77%, se encontra na zona norte da capital paraibana.

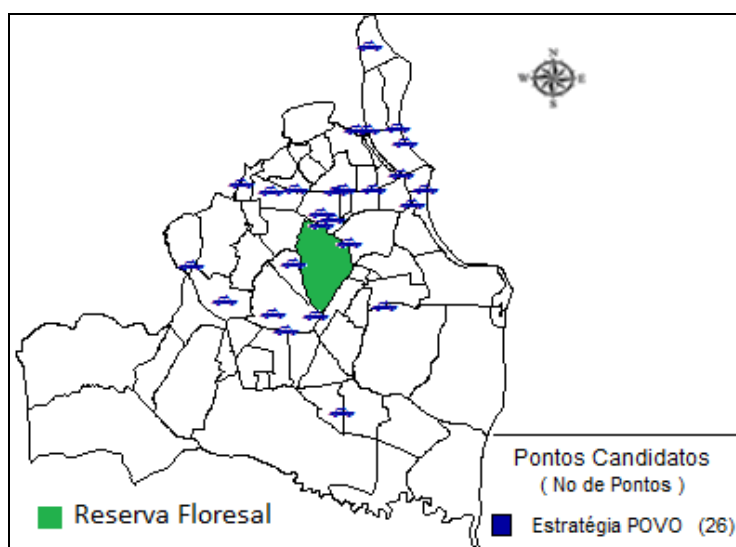


Figura 5.4 - Mapa de Distribuição dos Pontos de Visibilidade Operacional - POVO

Para melhor avaliação da localização dos pontos de visibilidade operacional, na Figura 5.5 estão plotadas as ocorrências de Crimes contra o Patrimônio, juntamente com a distribuição espacial das viaturas do POVO.

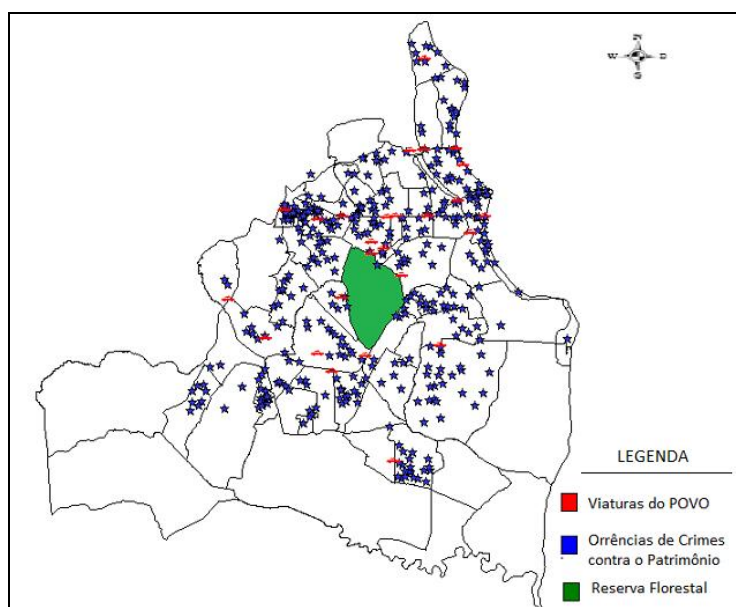


Figura 5.5 - Distribuição espacial de Viaturas do POVO e Ocorrências de Crimes contra o

5.2.2 Modelo de p -mediana

Em Mitchell (1972), verifica-se uma aplicação testada em Anaheim, Califórnia-EUA, que utiliza o modelo de p -medianas com o propósito de minimizar a distância total percorrida por uma patrulha policial para atender chamadas emergenciais. Por outro lado, Bandyopadhyay (2012) aborda o problema de p -medianas para determinar localizações de facilidades emergenciais, após a identificação de *hotspots*. Enquanto, Curtin et al (2010) enfatizam que o problema de p -medianas pode ser melhor empregado para segmentação dos *hotspots* de crime. Já Lorena *et al* (2001) relataram a efetividade do modelo de p -medianas integrado ao SPRING para situar facilidades em "algum tipo de atividade", o que motivou o uso desta ferramenta na fase de seleção de locais candidatos ao posicionamento de viaturas policiais. Diante desse contexto e com base no estudo de Lorena *et al* (2001), optou-se pelo algoritmo de problema de p -medianas integrado no SPRING, como estratégia para também se eleger pontos candidatos. Levando em consideração que na estratégia anterior foram definidos 26 pontos de visibilidade operacional, decidiu-se também adotar este quantitativo no problema de p -medianas.

Desse modo, de posse das ocorrências de crimes no formato de dados cadastral, através da opção Localização de Medianas, no menu Cadastral do SPRING localizou-se 26 medianas, cujos centróides estão apresentados na Figura 5.6, em forma de círculos. Para o cálculo das medianas foi utilizada a distância linear proposta pelo modelo.

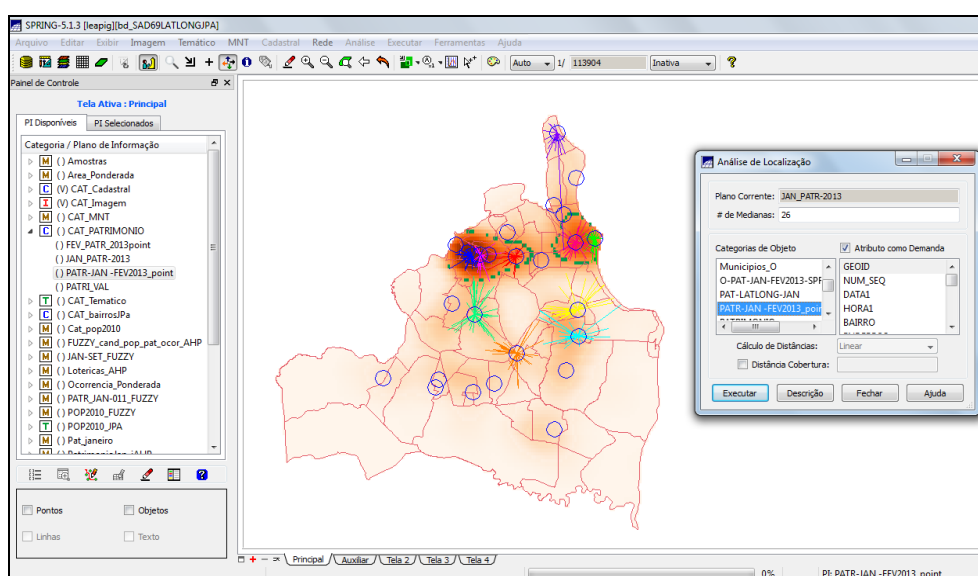


Figura 5.6 - Mapa de 26-medianas geradas no SPRING

No Centro da cidade, área onde se registrou um *hotspot* crônico, foram geradas 4 medianas o que corresponde a quatro locais candidatos para posicionar viaturas naquela área.

5.2.3 Uso da técnica de agrupamento *k-means*

De acordo com Oliveira (2012), o problema de localização de k facilidades pode ser sintetizado em localizar k centróides no plano, de modo que o problema de posicionar facilidades pode ser resolvido de uma maneira relativamente rápida pelo método *k-means*. Sendo assim, os centróides gerados pelo *k-means*, nesta abordagem, serão também considerados como locais candidatos para situar viaturas. Para tanto, como nas duas estratégias anteriores, também serão definidos 26 pontos candidatos (centróides) para contribuírem com a solução final. Deste modo, para gerar os 26 centróides utilizou-se o algoritmo *k-means* do Matlab. A matriz de entrada de dados é formada pelas coordenadas (latitude e longitude) das ocorrências de Crimes Contra o Patrimônio apresentadas na Figura 4.2. O método utilizado para escolher as posições iniciais dos centróides foi o *default sample*, o qual previamente seleciona randomicamente k observações do conjunto de entrada. Admitiu-se 10 repetições de clusterização, o que significa que em cada uma delas, o *k-means* gerava um novo conjunto de posições iniciais dos centróides. A solução final gerada pelo *k-means*, contendo 26 clusters e respectivos centróides, está exibida na Figura 5.7.

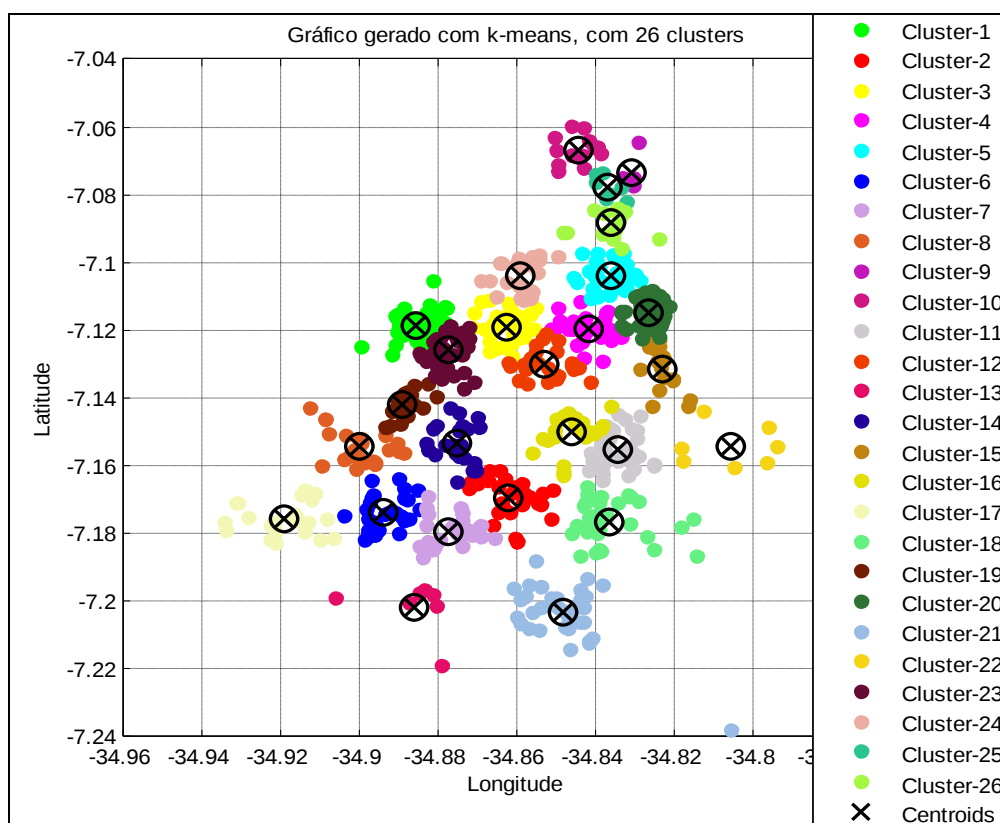


Figura 5.7 - Distribuição espacial de 26 clusters e respectivos centróides

Verifica-se que ao contrário dos pontos gerados pela estratégia *p-medianas*, na qual os 26 pontos candidatos foram eleitos do próprio conjunto de crimes georreferenciados, na estratégia *k-means*, pela própria característica do método, nenhum dos 26 centróides coincidiram com qualquer

posição do conjunto de ocorrências (Figura 5.2), a exemplo do centróide de número 22 que pode ser visualizado na Figura 5.7. No entanto, é representativa a solução do *k-means*, pois no contraponto do mapa da distribuição espacial dos crimes, percebe-se que a geração dos 26 centróides foi, na maioria, em locais onde ocorreu a maior concentração de crimes. Nota-se ainda nas zonas de *hotspots*, a presença de 2 centróides no Centro e 1 nas proximidades de Tambaú e Manaíra.

5.2.4 Locais candidatos

O resultado final da seleção de locais candidatos corresponde ao conjunto composto por 78 posições geográficas, fruto do somatório dos 26 pontos gerados em cada uma das três estratégias declaradas: decisão do gestor, *p*-medianas e *k-means*. No mapa temático da Figura 5.8, verifica-se os 78 locais candidatos a situar viaturas policiais, distribuídos, na grande maioria, em posições distintas, ocupando uma área de maior abrangência na cidade de João Pessoa. Nota-se ainda que adotando estratégias diferenciadas, os locais eleitos assumem posições diversas, incorporando as vantagens e características de cada método: experiência do gestor, similaridade das ocorrências dentro de cada cluster e a menor distância entre a demanda e a respectiva facilidade.

A seleção de locais candidatos é um processo crucial, porque o conjunto de pontos eleitos refletirá diretamente na qualidade da solução do modelo formulado para localização de viaturas operacionais.

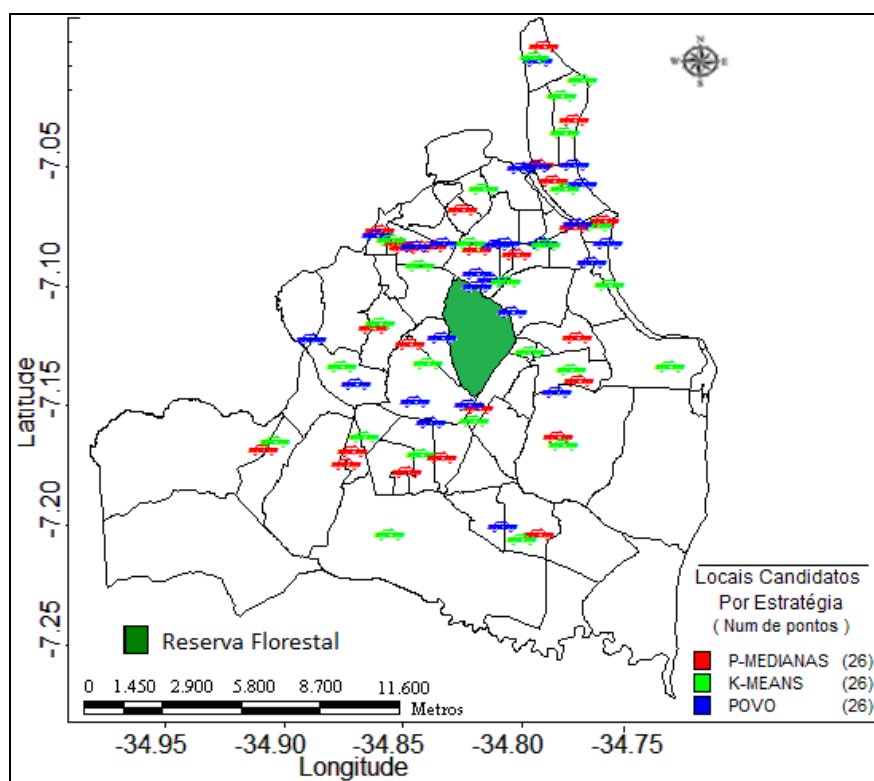


Figura 5.8 - Distribuição do conjunto de pontos candidatos selecionados

Observa-se ainda que na área do Centro (onde foi identificado *hotspot* crônico), foram eleitos 8 pontos para posicionamento de viaturas (Figura 5.9), caracterizando a eficiência do emprego de mais de uma estratégia, para seleção de pontos candidatos.

Porém, esta avaliação só foi possível com a identificação prévia da zona quente de criminalidade, naquele bairro. Caso contrário, não haveria parâmetros de comparação e avaliação da qualidade dos pontos eleitos, para situar viaturas com prioridade, em locais de maior concentração de crimes, visando inibir e reduzir a incidência naquela localidade.

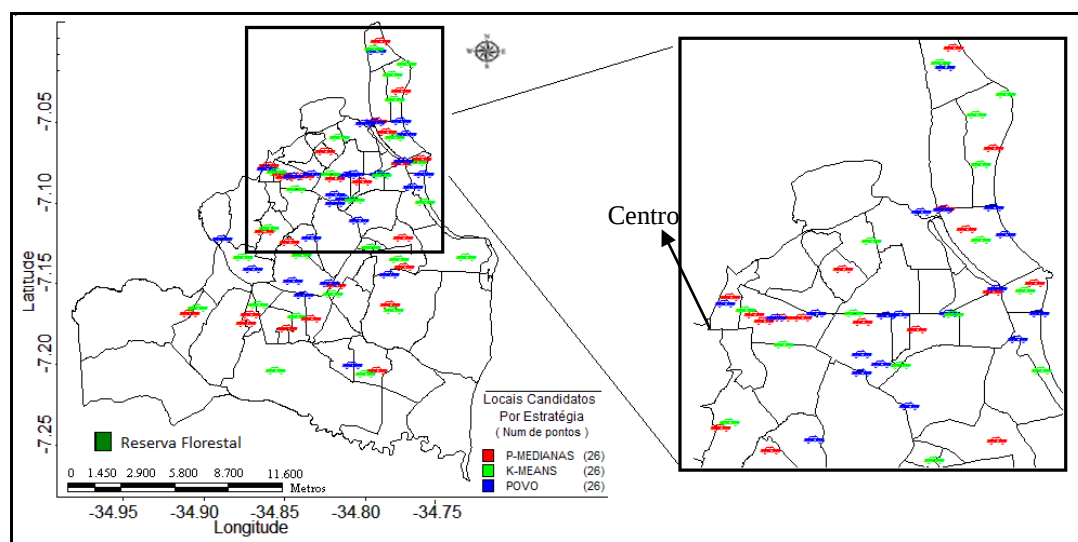


Figura 5.9 - Distribuição de pontos candidatos, enfatizando o Centro

O conjunto de locais candidatos tem grande influência sobre a solução final apresentada por um modelo de localização de facilidades. Sendo assim, o uso de estratégias variadas para eleger esses locais candidatos demonstrou ser muito importante porque os pontos tenderão a apresentar características diferenciadas e ocupar maior abrangência espacial. Na pesquisa, os 78 pontos evidenciados, nas três estratégias, foram utilizados como dados de entrada para o modelo matemático que será formulado com objetivo de localizar viaturas policiais para atender o máximo de pessoas, em um intervalo de tempo aceitável.

5.3 Modelo de alocação de viaturas policiais

Antes do emprego de ferramentas computacionais para geração de uma solução viável, direcionada ao posicionamento de viaturas policiais, decidiu-se fazer uma análise prévia da distribuição espacial das ocorrências na capital paraibana com objetivo de identificar, ou não, a presença de áreas quentes de criminalidade (*hotspots*). A existência ou não de *hotspots* servirá de guia para definir espaço geográfico e abordagens adotadas para resolução do problema.

Deste modo, após analisar o comportamento espacial das ocorrências buscou-se encontrar

uma solução que pudesse contribuir para redução ou inibição de crimes naquelas áreas, principalmente nos *hotspots*. Sendo assim, para resolver o problema de alocação de viaturas policiais foram utilizadas duas abordagens: uma exata e a outra aproximada. No tocante a abordagem exata, foi proposto um modelo matemático no qual posteriormente acrescentou-se uma variável e um parâmetro de penalidade para evidenciar o conceito de sobrecarga de atendimento de ocorrências sobre uma viatura. Ainda foram implementadas duas meta-heurísticas híbridas para resolver o problema de forma aproximada.

Um algoritmo é considerado híbrido quando combina ou integra duas ou mais abordagens de heurísticas ou quando agrega dois métodos distintos, tais como heurísticas e métodos exatos. De acordo com Maniezzo (2009), o uso de meta-heurísticas híbridas vem crescendo porque tais procedimentos tem retornado soluções consideradas de boa qualidade. Nesta pesquisa foram adotadas duas meta-heurísticas híbridas, combinando:

- GRASP e VND e
- GRASP e Método Exato.

A resolução de um mesmo problema com emprego de métodos exatos e aproximados foi observada em Chaves *et al* (2008), os quais, através da modelagem matemática proposta, obtiveram solução ótima para o problema do caixeiro viajante com coleta de prêmios. Porém, quando o solver não conseguiu mais resolver o problema com uma instância contendo mais de 31 vértices, os pesquisadores partiram para abordagem aproximada com a implementação de uma meta-heurística híbrida GRASP-VND.

Em Correia (2010), verifica-se a utilização da meta-heurística GRASP para resolver o problema do Tribunal Regional Eleitoral da Paraíba. Nessa aplicação, tem-se como objetivo minimizar o tempo gasto na apuração dos votos, durante um processo eleitoral, devido ao posicionamento otimizado dos centros de coleta e transmissão dos disquetes das urnas eletrônicas. Por outro lado, Gonçalves (2010) propôs algoritmos baseados nas meta-heurísticas GRASP e ILS para resolver Problemas de Cobertura de Conjuntos por Pares (PCCP). Apresentado por Hassin e Segev (2005), o PCCP trata de uma generalização do Problema de Cobertura de Conjuntos (PCC), de maneira que os elementos devem ser cobertos por um par de objetos e não por um simples objeto (PCC).

5.3.1 Abordagem exata

Visando encontrar a solução ótima para o problema de alocação de viaturas policiais, neste trabalho é proposto um modelo matemático para o problema de localização de máxima cobertura, baseado no problema *Police Patrol Area Covering* (PPAC), apresentado no Capítulo 4.

5.3.1.1 Modelagem matemática para o problema de alocação de viaturas policiais

O modelo de localização de máxima cobertura proposto para o problema posicionamento eficiente de viaturas policiais foi construído para possibilitar que guarnições de polícia sejam designadas para atender o máximo de pessoas em um tempo aceitável, levando em consideração as prioridades dos incidentes, a capacidade da viatura e a cobertura adicional (*backup*).

Os dados de entradas considerados no modelo são:

- C , conjunto de pontos candidatos i ao posicionamento de viaturas, ou seja, $C = \{ \text{conjunto de locais candidatos } i / i = 1, 2, \dots, m \}$;
- m representa a quantidade de pontos candidatos ;
- J , representa o conjunto de ocorrências j que poderão ser cobertas, de modo que, $J = \{ \text{conjunto de ocorrências } j / j = 1, 2, \dots, n \}$;
- n corresponde a quantidade ocorrências a serem atendidas;
- a_j contempla a prioridade da ocorrência j ;
- P_{se} é quantidade de viaturas disponíveis que serão posicionadas, nos respectivos setores operacionais S_e , onde $se \in S_e$
- S representa a distância de cobertura aceitável para o serviço (pode ser substituída por tempo de resposta)
- d_{ij} é a menor distância entre o ponto candidato i e a ocorrência j
- $N_i = \{ j \in J \mid d_{ij} \leq S \}$, conjunto de ocorrências que poderão ser cobertas pela viatura alocada no ponto candidato i , dentro da distância S .
- c_i quantidade limite de ocorrências j (capacidade) que uma viatura situada no local candidato i poderá cobrir.

Sabe-se que o problema de alocação de facilidades em locais candidatos se reduz a uma decisão (sim=1 ou não=0) para cada ponto candidato em que se deseja posicionar uma facilidade. Deste modo, no modelo proposto quando um local candidato ao posicionamento de viaturas for selecionado, significa que nele será posicionada um veículo oficial. Sendo assim, o modelo considera as seguintes variáveis de decisão:

- x_i é a variável binária de posicionamento, onde $x_i = 1$ se existir uma viatura posicionada no ponto candidato i , caso contrário $x_i = 0$.
- z_{ij} é a variável binária de cobertura, onde $z_{ij} = 1$ indica que a viatura posicionada no ponto candidato i poderá cobrir a ocorrência j , caso contrário $z_{ij} = 0$.

Por fim, segue a formulação do modelo proposto:

$$\text{Maximize } f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) = \sum_{i \in C} \sum_{j \in N_i} a_j z_{ij} \quad (5.1.a)$$

$$\text{Sujeito a } z_{ij} \leq x_i, \forall i \in C, \forall j \in N_i \quad (5.2.a)$$

$$\sum_{j \in N_i} a_j z_{ij} \leq c_i, \forall i \in C \quad (5.3.a)$$

$$\sum_{i \in Se} x_i = P_s, \forall_s \in Se \quad (5.4.a)$$

$$z_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in C, \quad (5.5.a)$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in C \quad (5.6.a)$$

Trata-se de um modelo capacitado cujo objetivo é maximizar o número de ocorrências atendidas, dentro de uma distância (tempo) crítica previamente definida. Sendo assim, a função objetivo em (5.1.a) definida como sendo $f : S \rightarrow R$ (S = conjunto das soluções viáveis) busca maximizar a cobertura (ou atendimento), possibilitando que uma ocorrência j seja atendida por uma ou mais viaturas, quando necessário. Enfatizando assim, o conceito de cobertura *backup* em que é permitido que uma ocorrência seja coberta por uma ou mais viaturas, aumentando a probabilidade de atendimento de um incidente policial. Dessa forma, o modelo proposto se aproxima ainda mais da realidade policial militar, na qual uma viatura *backup* poderá ser acionada tanto para atender uma ocorrência pendente, assim como, para apoiar outra guarnição que estiver precisando de reforço em incidentes mais grave ou complexo. Na Polícia Militar, leva-se também em consideração a natureza ou gravidade da ocorrência, antes de uma viatura ser acionada para se deslocar até o local do incidente. Deste modo, dar-se prioridade àquelas ocorrências consideradas mais graves e que oferece maior risco a integridade física do cidadão. Neste sentido, de acordo com a natureza ou gravidade, cada ocorrência tem uma prioridade pré-fixada para ser atendida por uma guarnição de polícia. Sendo assim, o modelo tratou a prioridade de uma ocorrência incluindo o parâmetro a_j , cujo valor define e prioriza a cobertura dos pontos de incidente (demanda).

No modelo, N_i representa o conjunto de todas as ocorrências j que poderão ser atendidas por uma viatura posicionada no ponto candidato i , obedecendo a distância de cobertura S ($d_{ij} \leq S$). Convenciona-se $n_{ij} = 1$, se a facilidade situada no local candidato i cobrir a ocorrência j , caso contrário, $n_{ij} = 0$. Com base na necessidade de tornar o modelo ainda mais próximo do mundo real, restrições foram formuladas para limitar a capacidade de atendimento de uma facilidade e o

número de viaturas lançadas por setor operacional. As restrições (5.2.a) indicam que um ponto candidato i só pode cobrir uma ocorrência j (z_{ij}) se o ponto candidato i estiver ativo (ou seja, se $x_i = 1$). Por isto, exige-se que z_{ij} seja sempre menor ou igual a $x_i = 1$, para o caso de $x_i = 0$, significa que não existe facilidade ativa naquele ponto candidato i . De acordo com as restrições (5.3.a), nem todas as ocorrências j identificadas nas restrições (5.2.a) serão atendidas pelo veículo localizado no ponto candidato i , em virtude da capacidade de atendimento da facilidade ser limitada pelo parâmetro c_i , (o qual restringe o número de incidentes a ser coberto por cada viatura). Em outras palavras, a viatura localizada no ponto candidato i somente atenderá a quantidade de ocorrência correspondente a capacidade c_i definida para a mesma, dentro do raio de cobertura S . Levando em consideração a escassez de recursos da Polícia Militar, o modelo proposto ainda exige que seja repassada com antecedência a quantidade de viaturas que deverá ser alocada por cada setor operacional. Este quantitativo de viaturas disponíveis por setor é imposto nas restrições (5.4.a) através do parâmetro P_{se} . Por isto, o somatório de pontos candidatos i selecionados ao posicionamento de viaturas deve ser exatamente igual a quantidade P_{se} de viaturas definida para os setores. E finalmente, as restrições (5.5.a) e (5.6.a) definem a natureza binária das variáveis de decisão z_{ij} e x_i , exigindo que somente valores inteiros binários sejam inseridos na solução. Reforça que uma viatura não pode ser dividida para atender mais de um setor simultaneamente.

5.3.1.2 Problema de alocação de viaturas com penalidade por sobrecarga

Diante do problema de máxima cobertura proposto, considera-se sobrecarga quando a quantidade de ocorrências associadas a uma viatura for maior do que a capacidade de atendimento imposto para o veículo. Na Figura 5.10 contextualiza-se o conceito de sobrecarga.

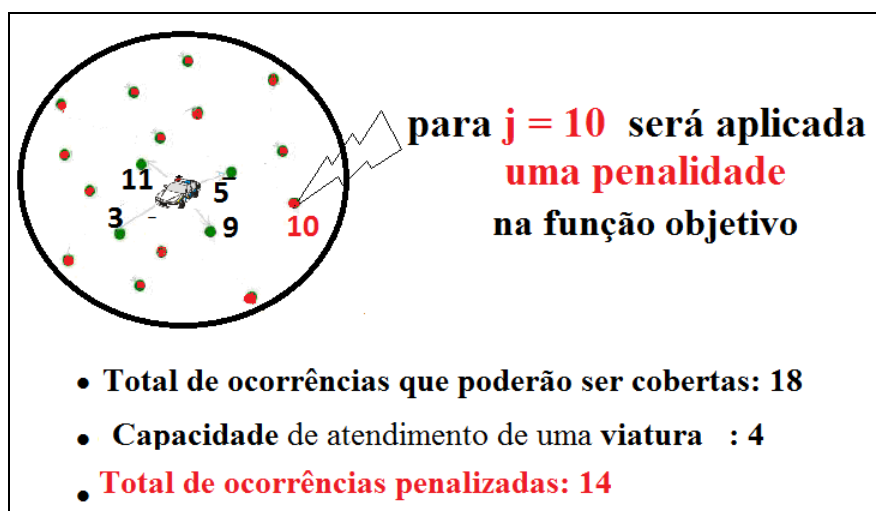


Figura 5.10 - Exemplo de sobrecarga de uma viatura

Visualiza-se na Figura 5.10 um conjunto N_i de 18 pontos de ocorrências que poderão ser cobertos por uma viatura posicionada no local candidato i , já que todos os incidentes estão dentro do raio S de cobertura. Sabe-se, de antemão, que a viatura situada no ponto candidato i tem a capacidade de somente atender até 4 ocorrências. Sendo assim, dentre as 18 ocorrências de N_i , apenas 4 delas ($j = 3, 5, 9 \text{ e } 11$) serão atendidas pela viatura, gerando assim, uma sobrecarga de 12 incidentes, (a exemplo da ocorrência 10), que não serão atendidos pela viatura posicionada no ponto candidato i , embora as 12 ocorrências estejam dentro da cobertura.

Deste modo, observa-se que todas as vezes em que se registra sobrecarga para uma viatura, existirão ocorrências, dentro do raio S de cobertura, que não serão atendidas pela viatura do ponto candidato i . Surgindo, desta maneira, um problema de planejamento, porque se não houver um bom planejamento para alocação de viaturas em determinadas áreas, a exemplo de *hotspots*, muitas ocorrências deixarão de ser atendidas. E essa falta de assistência da força policial, na prática, é motivo de muita insatisfação por parte da população. Neste sentido, para aumentar a probabilidade de uma ocorrência ser atendida, além da cobertura *backup*, serão impostas penalidades a cada ocorrência que exceder a capacidade de atendimento da viatura posicionada no ponto candidato i . Para tanto, será aplicada uma penalidade β (na função objetivo) para cada ocorrência j que não for atendida pela viatura posicionada no local candidato i , em decorrência da capacidade definida antecipadamente para o parâmetro c_i . A definição do valor de c_i é de suma importância porque quanto maior a capacidade c_i , maior será a probabilidade de ocorrências deixarem de ser atendidas. Para um modelo ser viável é preciso obedecer todas as restrições. Então, optou-se incluir uma variável de sobra na restrição (5.3.a) - que limita a capacidade c_i de atendimento de uma viatura - para associar às ocorrências j que não poderão ser atendidas à respectiva facilidade posicionada no local candidato i . Deste modo, na restrição (5.3.a) foi adicionada a variável binária de folga t_i para indicar cada ocorrência j que não será assistida pela viatura posicionada no ponto candidato i devido a capacidade c_i . Nota-se que t_i é uma variável inteira que pode assumir valores igual ou maiores que zero, isto porque poderá ocorrer situações em que não exista sobrecarga.

A função objetivo (5.1.b) com a penalidade β , assim como a restrição (5.3.b) com a variável de sobra t_i serão apresentadas a seguir :

$$\text{Maximize } Z = \sum_{i \in C} \sum_{j \in N_i} a_j z_{ij} - \sum_{i \in C} \beta t_i \quad (5.1.b)$$

$$\sum_{j \in N_i} a_j z_{ij} \leq c_i + t_i, \quad \forall i \in C \quad (5.3.b)$$

onde:

- t_i é a variável binária de penalidade de ocorrências não cobertas por uma viatura situada no ponto candidato i , onde $t_i \geq 0$, $\forall_i \in C$.
- β é parâmetro de penalidade, onde $\beta = \frac{1}{|J|}$

5.3.1.3 Modelagem matemática com penalidade por sobrecarga

O problema de alocação de viaturas com penalidade por sobrecarga tem a seguinte formulação matemática é:

$$\text{Maximize } Z = \sum_{i \in C} \sum_{j \in N_i} a_j z_{ij} - \sum_{i \in C} \beta t_i \quad (5.1.b)$$

$$\text{Sujeito a } z_{ij} \leq x_i, \quad \forall_i \in C, \forall_j \in N_i \quad (5.2.b)$$

$$\sum_{j \in N_i} a_j z_{ij} \leq c_i + t_i, \quad \forall_i \in C \quad (5.3.b)$$

$$\sum_{i \in se} x_i = P_s, \quad \forall_s \in Se \quad (5.4.b)$$

$$z_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall_i \in C, \forall_j \in N_i \quad (5.5.b)$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad \forall_i \in C \quad (5.6.b)$$

$$t_i \geq 0 \quad \forall_i \in C \quad (5.7.b)$$

5.3.2 Abordagem heurística

Mesmo destacando que o método exato obteve êxito na resolução do modelo proposto, convergindo para a solução ótima na maioria das instâncias, (exceto na instância de 10.058 incidentes), decidiu-se implementar algoritmos heurísticos híbridos para encontrar uma boa solução para o problema de alocação de viaturas policiais quando a entrada de dados for igual ou superior a 10.058 ocorrências.

5.3.2.1 Meta-heurística GRASP+VND

Para o problema de máxima cobertura, uma solução corresponde a um conjunto de facilidades que podem atender uma demanda, no intervalo da distância/tempo S padrão. Sendo assim, ao utilizar a meta-heurística GRASP+VND:

- Uma solução será construída, elemento a elemento, na fase de construção.
- A heurística VND (*Variable Neighborhood Descend*) será utilizado na segunda fase do GRASP para refinar a solução gerada, com o qual busca-se encontrar um ótimo local na vizinhança da solução gerada.

Exibe-se na Figura 5.11 o algoritmo da meta-heurística GRASP+VND adotado no trabalho. O pseudo-código apresenta dois parâmetros de entrada: o parâmetro α responsável pelo grau de aleatoriedade aplicado na etapa de construção da solução e a quantidade máxima de iterações $GRASP_{max}$ (linhas 2 e 3). Concluídas todas as iterações, o algoritmo retorna a melhor solução s encontrada pelo GRASP (linha 17).

```

Algoritmo GRASP+VND ( $\alpha$ ,  $GRASP_{max}$ )
1  Entrada
2     $\alpha$           - valor de aleatoriedade;
3     $GRASP_{max}$    - número máximo de iterações;
4  Saída
5     $s$  - a melhor solução encontrada;
6  Início
7     $f^* \leftarrow 0$ ;
8    Para  $iter \leftarrow 1$  até  $GRASP_{max}$  faça
9       $s \leftarrow FaseDeConstruçãoDeSolução(\alpha)$ ;
10      $s \leftarrow VND(s)$ ;
11     Se  $f(s) > f^*$  então
12        $s' \leftarrow s$ ;
13        $f^* \leftarrow f(s)$ ;
14     fim-se;
15   fim para
16    $s \leftarrow s'$ ;
17   Retorne( $s$ )
Fim-GRASP+VND

```

Figura 5.11 - Pseudocódigo da Meta-heurística GRASP+VND

Nas linhas 9 e 10, respectivamente, estão descritas as duas fases do GRASP: fase de construção e fase de refinamento da solução. Observa-se ainda que durante as $GRASP_{max}$ iterações, o procedimento VND é responsável pela busca local (linha 10) para refinar a solução s construída pelo procedimento de construção na linha 9.

5.3.2.1.1 Busca local com base na heurística VND

A heurística VND proposta por Mladenovic e Hansen (1997) consiste em um método de busca local que busca explorar o espaço de soluções através de trocas sistemáticas de estruturas de vizinhança. O método utiliza uma estrutura de vizinhança principal visando melhorar a solução corrente. Quando verifica que não é mais possível melhorar uma solução, o método troca a vizinhança corrente por outra. O procedimento retorna a vizinhança principal quando uma melhor solução é encontrada. O algoritmo termina após utilizar todas as estruturas de vizinhança sem conseguir melhorar a solução corrente.

Para resolução do problema de alocação de viaturas, decidiu-se empregar o método VND na fase de busca local do GRASP em virtude da existência de duas possíveis vizinhanças identificadas a saber: setor operacional e cobertura. Na Seção 3.1.1, foram exibidos os setores operacionais nos quais viaturas são lançadas em João Pessoa para atenderem às solicitações da comunidade. A distribuição das viaturas na Polícia Militar ocorre utilizando o critério do setor. De modo que para cada setor, diariamente é lançado um número fixo de viaturas. O outro conceito de vizinhança foi inspirado da própria definição de cobertura, em que considera um ponto de demanda coberto quando a distância entre este ponto e a facilidade estiver dentro do raio S de cobertura máxima. Deste modo, S corresponde a máxima distância entre o ponto de demanda e a facilidade, o que faz gerar a cobertura que representa um *buffer* ao redor da facilidade (Figura 2.1.2-a da Seção 2.4.11).

Sendo assim, a existência dessas duas vizinhanças (setor e cobertura) no problema de alocação de viaturas, justificou a escolha da técnica VND para ser implementada na etapa de busca local do algoritmo GRASP proposto.

Diante do cenário, duas estruturas de vizinhança foram definidas para o VND proposto: Troca de setor (*SectorSwap*) e Troca de cobertura (*CoveringSwap*). Na vizinhança *CoveringSwap*, os movimentos para a escolha da melhor solução vizinha são menores e mais eficiente computacionalmente, quando comparado com a vizinhança *SectorSwap*. Entretanto, o *SectorSwap* é mais abrangente no tamanho da vizinhança explorada, tornando-se assim, mais eficaz na melhoria da solução. Os pequenos movimentos influenciaram na escolha da ordem de análise das vizinhanças: primeiro será executada a *CoveringSwap* e depois a *SectorSwap*.

Por definição na pesquisa a vizinhança *CoveringSwap* (N_1) está contida na vizinhança *SectorSwap* (N_2) exatamente porque uma área de cobertura deve estar contida em algum setor operacional. Além do mais, o espaço de cada setor operacional por ser fisicamente maior que a área de cobertura possui uma quantidade maior de viaturas o que contribui para melhorar ainda mais a qualidade da solução depois do *CoveringSwap*.

Na Figura 5.12 é exibido o pseudocódigo do método VND proposto. Verifica-se respectivamente, nas linhas 2, 3, 4 e 5, que o algoritmo recebe como entrada: o número de vizinhanças r que no caso são duas - N_1 e N_2 , a solução inicial s_0 para ser melhorada e os conjuntos das duas vizinhanças *CoveringSwap* e *SectorSwap* (N_1 e N_2). Como saída, o algoritmo retorna a solução melhorada (linha 7).

```

Algoritmo VND ( $S_0, N_1, N_2$ )
1 Entrada
2    $r \leftarrow 2$  - Número de vizinhanças
3    $S_0$          - solução inicial;
4    $N_1$          - Vizinhança Troca de Cobertura-CoveringSwap
5    $N_2$          - Vizinhança Troca de Setores - SectorSwap
6 Saída
7    $s$  - solução refinada;
8 Início
9    $s \leftarrow s_0$  { Solução corrente }
10   $k \leftarrow 1$ ; { Tipo da vizinhança corrente }
11  Enquanto ( $K \leq r$ ) faça // ( $K \leq 2$ )
12    Encontre o melhor vizinho  $s' \in N_k(s)$ 
13    Se  $f(s') > f(s)$  então
14       $s \leftarrow s'$ ;
15       $k \leftarrow 1$ ;      { primeira vizinhança }
16    Senão
17       $k \leftarrow k + 1$ ; { próxima vizinhança }
18    fim-se;
19  fim enquanto
20 Fim-VND

```

Figura 5.12 Algoritmo da heurística VND na busca local

Nota-se ainda na linha 10 da Figura 5.12 que a busca local começa na vizinhança N_1 ($k \leftarrow 1$), com objetivo de encontrar uma possível melhor solução vizinha de s' (ver linhas 12, 13 e 14). Somente será realizada uma varredura na segunda vizinhança N_2 ($k \leftarrow 2$), quando não for encontrada nenhuma solução melhor em N_1 (ver linhas 12 a 17). Deste modo, a atualização da melhor solução é realizada na linha 14. Esta atribuição ocorre sempre que uma solução s' for melhor do que a solução s . O *loop* será reiniciado para uma nova busca local em N_1 (linha 15). E assim, o laço compreendido entre as linhas 12 e 17 será repetido até que as duas vizinhanças sejam analisadas sem sucesso para obter uma solução melhor.

5.3.2.2 Meta-heurística híbrida: GRASP+MétodoExato

Uma abordagem de meta-heurística híbrida enaltecendo algoritmo heurístico e métodos exatos foi observado em Gonçalves (2010). Duas estratégias podem ser evidenciadas quando se deseja usar a integração de meta-heurística com métodos exatos:

- 1 - A heurística pode funcionar como guia e controlar o procedimento exato.
- 2 - A abordagem exata aciona e controla a estratégia heurística

Neste trabalho, de forma semelhante em Gonçalves (2010), optou-se por considerar o método exato como uma intensificação realizada após o procedimento heurístico, fazendo com que o método exato funcione como uma busca local. Neste sentido, o método exato será responsável pela melhoria da solução s gerada pela heurística GRASP. Deste modo, a heurística irá construir uma solução s composta pelo conjunto de P viaturas a serem posicionadas nos pontos candidatos i ativos. A solução recém-criada s será repassada ao modelo exato para que o mesmo consiga otimizar a alocação de pontos de ocorrências j às respectivas viaturas P da solução construída. Em outras palavras, a heurística vai solicitar que o modelo exato faça a melhor alocação de pontos de ocorrências às respectivas viaturas. Devido a destinação, o modelo exato passará a ser tratado por ModeloDeAlocaçãoDeViaturas.

Na Figura 5.13, ilustra-se a heurística híbrida GRASP+ModeloExato. Nota-se na Figura 5.13-a que a solução da heurística é resumida, uma vez que somente aponta quais são os melhores locais ao posicionamento de viaturas. Como consequência, o modelo exato durante a busca local, de acordo com a capacidade e cobertura, aloca pontos de ocorrências às respectivas facilidades (figura 5.4-b).

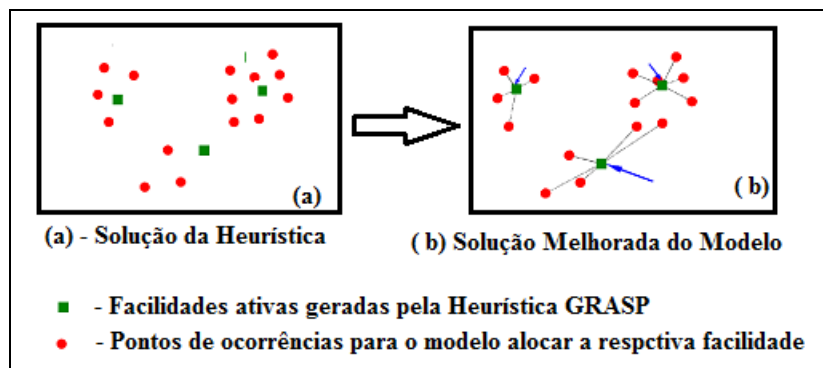


Figura 5.13 - Meta-heurística GRASP+MétodoExato

Deste modo, para cada facilidade ativa gerada pela Meta-heurística GRASP, no ModeloDeAlocaçãoDeViaturas serão criadas restrições com valor igual a 1 com base no número de viaturas P ativas apontado pela heurística, ou seja, restrições com $x_i = 1$, onde $i = 1, 2, \dots, P$, onde P é o número de viaturas ativas. Na Figura 5.13 pode ser visualizado o algoritmo proposto para a meta-heurística híbrida GRASP+ModeloDeAlocaçãoDeViaturas.

```

Algoritmo GRASP+ModeloDeAlocaçãoDeViaturas (  $f(\cdot)$ ,  $g(\cdot)$ ,  $MaxIter$ ,  $s$  )
1      CarregaInstânciaDeEntrada ( );
2      para (  $Iter = 1$  até  $MaxIter$  ) faça
3          ConstroiSolução (  $g(\cdot)$ ,  $\alpha$ ,  $s$  );
4          AtualizarSolução (  $s$  );
5      fim-para
6      ModeloExato  $\leftarrow$  CriarModelo(  $s$  )
7       $s^* \leftarrow$  SolverModeloExato( ModeloExato )
8      Retornar (  $s^*$  )
Fim GRASP+ModeloDeAlocaçãoDeViaturas

```

Figura 5.13 - Algoritmo Meta-heurística GRASP+ModeloDeAlocaçãoDeViaturas

Nota-se que a estrutura deste procedimento é idêntico ao GRASP, das linhas 1 a 5, apenas a busca local foi removida. Na linha 6 é criado o modelo com as variáveis de decisão de posicionamento x_i ativas na solução s criada pelo GRASP para cobrir pontos de ocorrências j . O procedimento para encontrar a solução ótima pelo modelo exato é visto na linha 7. Trata-se de um modelo exato considerado resumido tendo em vista o número menor de variáveis. Vale salientar que o modelo exato não garante que irá obter o ótimo global, mas determinará a melhor solução possível utilizando as facilidades repassadas pela solução heurística. A melhor solução s encontrada pelo modelo é retornada na linha 8.

Segue a formulação do modelo exato apresentado na linha 6 da Figura 5.13 como busca local na meta-heurística híbrida GRASP+ ModeloDeAlocaçãoDeViaturas :

$$\text{Maximize } f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) = \sum_{i \in C} \sum_{j \in N_i} a_j z_{ij} \quad (5.1.c)$$

$$\text{Sujeito a} \quad \sum_{j \in N_i} a_j z_{ij} \leq c_i, \quad \forall_i \in C \quad (5.2.c)$$

$$x_i = 1, \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, P \quad (5.3.c)$$

$$z_{ij} = \{0, 1\} \quad \forall_i \in C, \quad (5.4.c)$$

$$x_i = \{0, 1\} \quad \forall_i \in C \quad (5.5.c)$$

O modelo criado na linha 6 possui a mesma função objetivo (5.1.a) e as mesmas restrições (5.3.a), (5.5.a) e (5.6.a) descritas na Seção 5.3.1 que trata sobre a abordagem exata. No ModeloDeAlocaçãoDeViaturas foram incluídas apenas as restrições (5.3.c) as quais dependem do resultado da heurística construtiva. Verifica-se que o total dessas restrições criadas estão diretamente ligadas ao total de viaturas P que poderão ser posicionadas nas facilidades ativas.

Capítulo 6 - RESULTADOS COMPUTACIONAIS

6.1 Instâncias

Experimentos computacionais foram realizados com instâncias de tamanhos variados - 202, 1492, 3282, 4129 e 10.058 registros. Essas instâncias fazem parte de dois grupos: grupo de ocorrências reais e grupo de instâncias fictícias. Pertencem ao primeiro grupo, as instâncias de 1492 e 202 ocorrências que foram apresentadas nas Seções 4.1 e 4.1.1, respectivamente. Na fase de testes com este grupo foram considerados dois espaços geográficos: João Pessoa e áreas de *hotspot*. Em João Pessoa foram consideradas as 1492 ocorrências espalhadas entre os 21 setores operacionais citados na Seção 3.1.1. A instância de 202 ocorrências foi empregada, em apenas um setor (ver Seção 3.1.1), para posicionamento de viaturas nos bairros do Centro e Varadouro onde foi identificado *hotspot*. Os 78 locais candidatos exibidos na Seção 5.3 foram empregados para encontrar a solução ótima, durante a resolução do problema de alocação de viaturas na cidade de João Pessoa. Dentre os 78 locais candidatos, 10 deles foram utilizados para encontrar a solução ótima no Centro e Varadouro.

As demais instâncias (3282, 4129 e 10.058) pertencem ao segundo grupo, no qual cada uma delas foi subdividida em 5 setores (5, 10, 15, 20 e 25). Considerou-se a métrica de cobertura aceitável S para cada instância fictícia, os valores de raio igual a 200, 400, 800 e 1000. Em virtude dos pontos de demanda serem considerados fictícios, as prioridades de cada ocorrência desse grupo foram geradas aleatoriamente.

6.2 Determinação do parâmetro para construção da solução no GRASP

Sabe-se que no GRASP, o parâmetro de aleatoriedade α corresponde ao único parâmetro que deve ser calibrado. Sendo assim, depois de experimentos iniciais, dentre os valores testados para observar as características de aleatoriedade e gulosa, observou que o algoritmo apresentou melhores resultados com $\alpha = 0,1$ (10%). Sendo assim, a construção da solução s foi mais gulosa do que aleatória. Um conjunto diversificado de soluções de boa qualidade foi obtido para as soluções serem refinadas durante a fase de busca local. Para tanto, adotou-se o seguinte o tamanho para a lista restrita de candidatos, $LRC = \{t \in C / g(t) \geq g(t_{\min}) + 0,1 * (g(t_{\max}) - g(t_{\min}))\}$.

6.3 Metodologia de testes

Inicialmente foram efetuados testes com as instâncias reais de ocorrências no modelo exato, proposto na Seção 5.3.1.1, o qual obteve êxito para encontrar a solução ótima em todas elas. No

segundo momento, 210 testes computacionais foram realizados com as instâncias consideradas fictícias. Nesses últimos testes, no entanto, o modelo somente logrou sucesso para resolver o problema com as instâncias menores que 10058 registros. Em virtude de restrições de memória do computador, com a instância de 10.058 pontos de ocorrências o método exato não chegou a apresentar resultados. Deste modo, não foi possível saber se o modelo iria obter a solução ótima ou não, uma vez que não foram realizados testes em computador de configuração superior. O enfoque a partir de então foi avaliar os métodos aproximados propostos. Sendo assim, decidiu-se testar as instâncias 3282, 4129 e 10058 registros com os procedimentos híbridos: GRASP+VND e GRASP+Modelo exato. Os 5 setores fictícios (5, 10, 15, 20 e 25) consistem, respectivamente, 5, 10, 15, 20 e 25 *clusters* de ocorrências gerados pelo *k-means* do MatLab. Desse modo, a cobertura para cada um desses 5 setores foi testada com os raios de cobertura *S* a saber: 200, 400, 800 e 1000.

Buscou-se fazer comparação entre os resultados obtidos em cada abordagem, tomando como base o valor da função objetivo gerada pelo modelo exato, tendo em vista que em algumas instâncias dos métodos aproximados a melhor solução encontrada por eles coincidiu com a solução ótima. A comparação dos resultados se deu através do valor do *GAP* o qual define a variação em percentual da melhor solução obtida por cada um dos dois algoritmos aproximados, tomando como base a solução exata.

Para tanto, o *GAP* adotado tem a seguinte fórmula:

$$GAP = 100 * (S_{grasp+exato} - S_{exato}) / S_{exato}, \text{ onde :}$$

- $S_{grasp+exato}$ é o custo da solução obtida no procedimento híbrido GRASP+Modelo Exato
- S_{exato} é o custo da solução no modelo exato.

Os testes foram realizados em um computador com Sistema Operacional Linux Ubuntu versão 12.04, tendo como processador um Intel Core 2 Quad com 4 processadores de 2.33 Gigahertz e 4 GB de memória RAM. As meta-heurísticas propostas foram implementadas na linguagem C++.

6.4 Resultados obtidos

Tempo de execução em minutos e o valor da função objetivo encontrados para as instâncias de 3298, 4129 e 10.058 pontos de incidentes, em cada uma das abordagens estudadas - exata e aproximada - podem ser vistos nas Figuras 6.1 6.2 e 6.3.

6.4.1 Resultados com a instância de 3298

Na tabela da Figura 6.1 é possível observar os resultados obtidos de testes computacionais com a instância de 3298 registros.

TAMANHO DA INSTÂNCIA	TOTAL de SETOR	RAIO DE COBERTURA (S)	TEMPO DE EXECUÇÃO (minutos)			VALOR DA FUNÇÃO OBJETIVO			Variação (Modelo Exato - GRASP+Modelo Exato)	GAP (%) da função Objetivo (Com base no Modelo Exato)	
			MODELO EXATO	GRASP + VND	GRASP + MODELO EXATO	MODELO EXATO	GRASP + MODELO EXATO	GRASP + VND		GRASP+ EXATO	GRASP+VND
3282	5	200	6,33	3,06	4,14	11342	11326	11054	16	-0,141	-2,54
		400	19,31	3,17	4,22	35181	35178	34929	3	-0,009	-0,72
		600	84,83	3,28	4,36	67224	67220	66945	4	-0,006	-0,42
		800	184,14	3,54	4,65	103351	103349	103069	2	-0,002	-0,27
		1000	331,89	4,03	5,13	41073	41070	40792	3	-0,007	-0,68
	10	200	7,50	1,45	2,56	8302	8295	8139	7	-0,084	-1,96
		400	47,53	1,48	2,53	25002	24995	24860	7	-0,028	-0,57
		600	54,72	1,58	2,68	47211	47209	47055	2	-0,004	-0,33
		800	94,49	1,77	2,85	71322	71320	71159	2	-0,003	-0,23
		1000	360,73	1,97	3,06	96959	96956	96797	3	-0,003	-0,17
	15	200	9,38	2,47	3,51	11451	11416	11113	35	-0,306	-2,95
		400	30,83	2,67	3,73	35021	35014	34710	7	-0,020	-0,89
		600	70,22	2,91	3,99	66100	66099	65827	1	-0,002	-0,41
		800	170,44	3,30	4,39	99215	99213	98940	2	-0,002	-0,28
		1000	281,38	4,11	5,25	131868	131867	131584	1	-0,001	-0,22
	20	200	5,70	2,15	3,25	12031	12013	11787	18	-0,150	-2,03
		400	20,37	2,58	3,66	35778	35776	35536	2	-0,006	-0,68
		600	52,70	2,71	3,81	65985	65983	65730	2	-0,003	-0,39
		800	156,18	3,00	4,16	99223	99220	98954	3	-0,003	-0,27
		1000	378,00	3,39	4,47	132378	132374	132086	4	-0,003	-0,22
	25	200	5,03	1,97	3,05	8782	8732	8432	50	-0,569	-3,99
		400	23,23	2,38	3,43	26415	26396	26124	19	-0,072	-1,10
		600	74,52	2,67	3,76	48995	48986	48746	9	-0,018	-0,51
		800	195,04	2,82	3,93	73358	73353	73085	5	-0,007	-0,37
		1000	352,93	3,16	4,27	98273	98266	98046	7	-0,007	-0,23

Figura 6.1 - Resultados obtidos com a instância de 3282 registros

O tempo de execução para resolver o problema com a meta-heurística híbrida GRASP+ModeloExato se aproximou do tempo gasto pelo modelo exato em algumas soluções evidenciadas nas Figura 6.1. Nota-se que a variação do custo entre essas soluções com reduzidos tempos computacionais chegou a ser 1 e 2. A pior variação do custo da função objetivo se verificou na instância de raio 200, com 25 setores, no qual a diferença foi 50 entre os custos do Modelo Exato e a Meta-heurística GRASP+VND. A segunda pior situação, com uma variação igual a 35 entre os custos do Modelo Exato e a Meta-heurística GRASP+ModeloExato, foi observada na instância de raio 200, com 15 setores. Porém, a solução com a meta-heurística foi obtida com um tempo de 2,47 minutos, bem inferior aos 9,38 minutos apresentados pelo modelo exato.

6.4.2 Resultados com a instância de 4129 registros

Com a instância de 4129 registros, verifica-se na Figura 6.2 que a meta-heurística híbrida GRASP+Modelo Exato alcançou quatro vezes a solução ótima, nos casos a saber: total de setor igual a 5 e raios 600 e 800, quantidade de setor igual a 10 e raio igual a 800 e por fim, na situação em que o quantitativo de setor é 20 com raio de 1000.

Neste contexto, verifica-se que para 10 setores e raio de cobertura igual a 800, o procedimento GRASP+Modelo Exato obteve a melhor solução (3647) no tempo computacional de 1,84 minutos contra os 263,50 minutos que o modelo exato gastou para resolver o problema e chegar na solução ótima (3647).

TAMANHO DA INSTÂNCIA	TOTAL de SETOR	RAIO DE COBERTURA (S)	TEMPO DE EXECUÇÃO (minutos)			VALOR DA FUNÇÃO OBJETIVO			Variação (Modelo Exato - GRASP+Modelo Exato)	GAP (%) da função Objetivo (Com base no Modelo Exato)	
			MODELO EXATO	GRASP + VND	GRASP + MODELO EXATO	MODELO EXATO	GRASP + MODELO EXATO	GRASP + VND		GRASP+EXATO	GRASP+VND
4129	5	200	27,45	0,11	1,86	599	598	592	1	-0,167	-1,17
		400	71,99	0,13	1,83	1402	1399	1394	3	-0,214	-0,57
		600	116,70	0,13	1,85	2507	2507	2503	0	0,000	-0,16
		800	263,50	0,13	1,84	3647	3647	3644	0	0,000	-0,08
		1000	-	0,14	1,84	-	4755	4753	-	-	-
	10	200	11,84	0,19	1,99	1108	1103	1090	5	-0,451	-1,62
		400	105,59	0,20	1,90	2497	2493	2481	4	-0,160	-0,64
		600	594,69	0,22	1,92	4338	4337	4324	1	-0,023	-0,32
		800	679,86	0,23	1,94	6417	6417	6401	0	0,000	-0,25
		1000	-	0,25	1,97	-	8733	8718	-	-	-
	15	200	10,70417	0,26	2,04	2033	2031	2012	2	-0,098	-1,03
		400	51,93361	0,27	1,98	4699	4693	4679	6	-0,128	-0,43
		600	139,9447	0,30	2,01	8270	8268	8251	2	-0,024	-0,23
		800	445,5833	0,32	2,00	12104	12102	12076	2	-0,017	-0,23
		1000	-	0,34	2,04	-	16352	16332	-	-	-
	20	200	8,781111	0,31	2,06	2438	2436	2410	2	-0,082	-1,15
		400	54,09611	0,35	2,05	5714	5710	5687	4	-0,070	-0,47
		600	96,08306	0,38	2,11	10083	10080	10056	3	-0,030	-0,27
		800	202,31	0,39	2,10	14864	14862	14830	2	-0,013	-0,23
		1000	632,4561	0,39	2,16	20006	20006	19982	0	0,000	-0,12
	25	200	13,87556	0,35	2,14	2925	2923	2894	2	-0,068	-1,06
		400	70,50667	0,41	2,14	6890	6888	6848	2	-0,029	-0,61
		600	123,0189	0,45	2,16	12351	12349	12315	2	-0,016	-0,29
		800	459,6947	0,48	2,20	18113	18110	18084	3	-0,017	-0,16
		1000	-	0,48	2,20	-	24914	24877	-	-	-

Figura 6.2 - Resultados obtidos com a instância de 4129 registros

Um fato curioso é possível observar na Figura 6.2. Verifica-se que para raio igual a 1000, o modelo não conseguiu apresentar a solução ótima em 4 tamanhos de setores - 5, 10, 15 e 25. No entanto, com um total de setor igual a 20, além de resolver o problema, a solução ótima (20006) foi encontrada pelo modelo exato e pelo procedimento GRASP+ModeloExato.

6.4.3 Resultados com a instância de 10.058 registros

Na Figura 6.3 pode se visualizar os resultados gerados com a instância de 10.058 pontos.

TAMANHO DA INSTÂNCIA	TOTAL de SETOR	RAIO DE COBERTURA (S)	TEMPO DE EXECUÇÃO (minutos)			VALOR DA FUNÇÃO OBJETIVO			Variação (Modelo Exato - GRASP+Modelo Exato)	GAP (%) da função Objetivo (Com base no Modelo Exato)	
			MODELO EXATO	GRASP + VND	GRASP + MODELO EXATO	MODELO EXATO	GRASP + MODELO EXATO	GRASP + VND		GRASP+ EXATO	GRASP+VND
10058	5	200	-	0,479	-	-	-	1400	-	-	-
		400	-	0,488	-	-	-	3154	-	-	-
		600	-	0,514	-	-	-	5199	-	-	-
		800	-	0,521	-	-	-	7799	-	-	-
		1000	-	0,524	-	-	-	9975	-	-	-
	10	200	-	0,636	-	-	-	2474	-	-	-
		400	-	0,663	-	-	-	5694	-	-	-
		600	-	0,695	-	-	-	9634	-	-	-
		800	-	0,734	-	-	-	13869	-	-	-
		1000	-	0,737	-	-	-	18533	-	-	-
	15	200	-	0,754	-	-	-	3874	-	-	-
		400	-	0,819	-	-	-	9164	-	-	-
		600	-	0,842	-	-	-	15499	-	-	-
		800	-	0,884	-	-	-	22618	-	-	-
		1000	-	0,917	-	-	-	30421	-	-	-
	20	200	-	0,903	-	-	-	4493	-	-	-
		400	-	0,942	-	-	-	10159	-	-	-
		600	-	1,007	-	-	-	17651	-	-	-
		800	-	1,085	-	-	-	26418	-	-	-
		1000	-	1,144	-	-	-	36968	-	-	-
	25	200	-	0,957	-	-	-	4693	-	-	-
		400	-	1,022	-	-	-	11383	-	-	-
		600	-	1,080	-	-	-	19748	-	-	-
		800	-	1,121	-	-	-	29226	-	-	-
		1000	-	1,163	-	-	-	40440	-	-	-

Figura 6.3 - Resultados obtidos com a instância de 10058 registros

Nota-se que a meta-heurística híbrida GRASP+VND foi o único procedimento que conseguiu obter solução para a instância de 10.058 ocorrências. Os menores tempos computacionais (4.79 e 4.88 minutos) foram observados, respectivamente, para raios de cobertura 200 e 400, com 5 setores. Por outro lado, para encontrar a melhor solução nos cenários com 20 e 25 setores, respectivamente, (ambos com raio igual a 1000), a meta-heurística híbrida GRASP+VND gastou os piores tempos computacionais registrados (1,144 e 1,163 minutos). Visualizando-se os resultados apontados em cada um dos 5 setores (5, 10, 15, 20 e 25), vislumbra-se uma tendência de crescimento do tempo de execução a medida que o raio aumenta (200, 400, 600, 800 e 1000). Para exemplificar, cita-se os tempos para 25 setores: 0,957, 1,022, 1,080, 1,121 e 1,163.

6.4.4 Tempos computacionais das abordagens

6.4.4.1 Melhor tempo

Comparando-se as três ferramentas empregadas nas abordagens exata e heurística, observou-se que, entre elas, o melhor tempo computacional (0,11 minutos) para obter a melhor

solução (592) foi registrado na meta-heurística híbrida GRASP+VND, com a instância de 4129 registros, distribuídos entre 5 setores, com raio de cobertura igual a 200.

Na Figura 6.4, visualiza-se ainda que, no mesmo cenário, o modelo exato gastou 27,45 minutos para exibir a solução ótima (599), contra o tempo de 1,86 minutos da meta-heurística híbrida GRASP+ModeloExato para encontrar a melhor solução (com custo de 598), a qual é bem próxima da solução ótima (599).

	MELHOR tempo (min)	Instância	Total de Setor	Raio (S)	Tempo para obter o resultado (min)			Custo da solução		
					MODELO EXATO	GRASP + VND	GRASP + MODELO EXATO	MODELO EXATO	GRASP + VND	GRASP + MODELO EXATO
MODELO EXATO	5,03	3282	25	200	5,03	1,97	3,05	8782	8432	8732
GRASP + VND	0,11	4129	5	200	27,45	0,11	1,86	599	592	598
GRASP + MODELO EXATO	1,83	4129	5	400	71,99	0,13	1,83	1402	1394	1399

Figura 6.4 - Melhor tempo

Deste modo, os dados da Figura 6.4 sugerem que a meta-heurística híbrida GRASP+VND foi a mais rápida (0,11 min) para obter a melhor solução (com custo igual a 592). No entanto, foi a meta-heurística híbrida GRASP+ModeloExato que apresentou a melhor solução (com custo no valor de 598) bem próxima da solução ótima (custo de 599), com um tempo computacional bem inferior (1,86 minutos) comparado com os 27,45 minutos do modelo.

6.4.4.2 Pior tempo

Na Figura 6.5 exibe-se, durante os testes, o pior tempo computacional (679,86 minutos) foi observado na execução do modelo exato para obter a solução ótima cujo custo foi de 6417, com a instância de 4129 ocorrências distribuídos entre 10 setores e raio igual a 800. Nesse mesmo cenário, a meta-heurística híbrida GRASP+ModeloExato também conseguiu encontrar a solução ótima (6417), porém com um tempo muito abaixo (1,94 min) do modelo exato (679,86 min). Desta forma, sugere-se que o procedimento híbrido GRASP+ModeloExato tenha sido mais eficiente do que o modelo exato.

	PIOR tempo (min)	Instância	Total de Setor	Raio (S)	Tempo para obter o resultado (min)			Custo da solução		
					MODELO EXATO	GRASP + VND	GRASP + MODELO EXATO	MODELO EXATO	GRASP + VND	GRASP + MODELO EXATO
MODELO EXATO	679,86	4129	10	800	679,86	0,23	1,94	6417	6401	6417
GRASP + VND	4,11	3282	15	1000	281,38	4,11	5,25	131868	131584	131867
GRASP + MODELO EXATO	5,25	3282	15	1000	281,38	4,11	5,25	131868	131584	131867

Figura 6.5 - Pior tempo de execução

Ainda se registra na Figura 6.5 que os piores tempos (4,11 min e 5,25 min) foram respectivamente das duas meta-heurísticas híbridas - GRASP+VND e GRASP+ModeloExato,

quando os procedimentos encontraram a melhor solução, utilizando coincidentemente a mesma instância, em que foram 3282 registros distribuídos entre 15 setores e raio de cobertura 1000.

6.4.5 Distribuição espacial de soluções obtidas

Para possibilitar a visualização espacial de soluções encontradas por cada um dos três métodos, foram escolhidas aleatoriamente dentre todas, as duas soluções apontadas para os respectivos cenários descritos a seguir:

- Instância de 3282 pontos, distribuídos em 10 setores, com raio de cobertura igual 600
- Instância de 4129 pontos, distribuídos em 10 setores, com raio igual a 200.

6.4.5.1 - Solução para a instância de 3282 pontos

Nas Figuras 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9 é possível ver a distribuição espacial da instância de 3282 pontos distribuídos entre 10 *clusters* (setores) e das soluções obtidas, respectivamente.

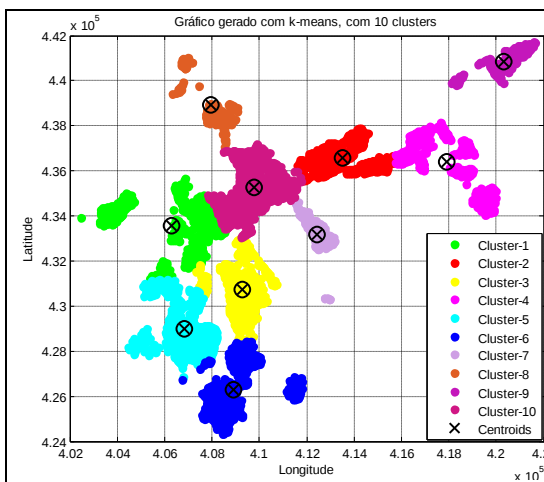


Figura: 6.6 - Distribuição espacial de 3282 ocorrências em 10 setores

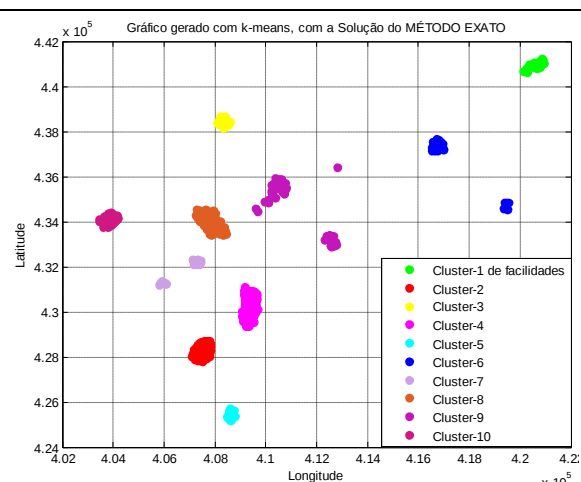


Figura: 6.7- Solução do método exato

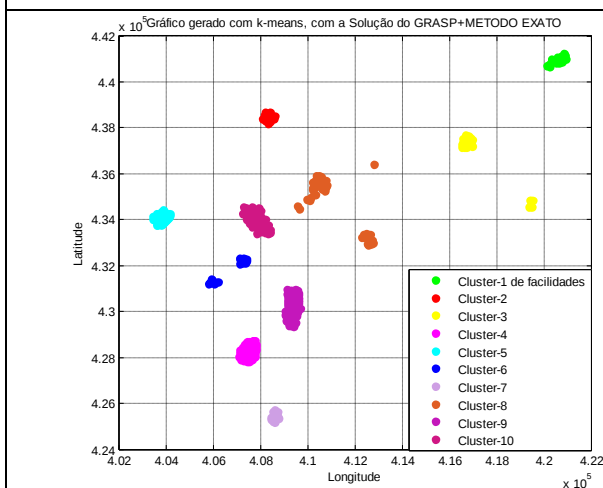


Figura: 6.8- Solução do método GRASP+ModeloExato

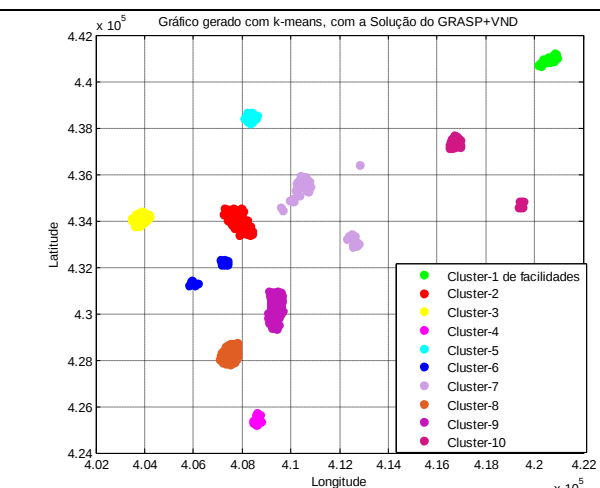


Figura: 6.9- Solução do método GRASP+VND

Com este cenário, a solução gerada apresenta 380 locais candidatos ao posicionamento de viaturas de modo que para facilitar a visualização espacial dos pontos, optou-se criar 15 *clusters* para plotar os pontos candidatos. Nas Figuras 6.7, 6.8 e 6.9 podem ser visualizadas respectivamente a distribuição espacial da melhor solução apontada para o posicionamento eficiente de viaturas em cada uma das abordagens - Método Exato, Meta-heurística híbrida GRASP+VND e Meta-heurística híbrida GRASP+MétodoExato. Visualmente, observa-se que os *clusters* gerados com as soluções obtidas são muito semelhantes, o que sugere dizer que os três métodos foram eficazes para o problema proposto, no cenário referente a instância de 3282 pontos distribuídos entre 10 setores, considerando o raio de cobertura igual a 600.

6.4.5.2 - Solução para a instância de 4129 ocorrências

As soluções apontadas pelos métodos empregados para a instância de 4129 pontos, distribuídos entre 10 setores (*clusters*), com raio de cobertura igual a 200 estão plotadas nas Figuras 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13.

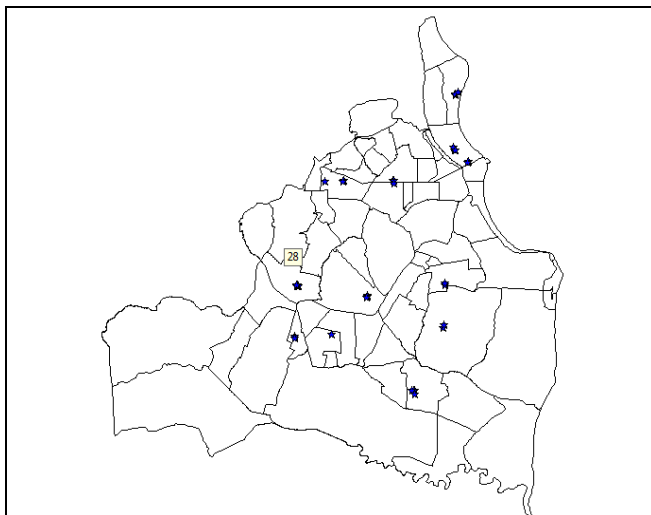


Figura: 6.10- Solução do método Exato no mapa de João Pessoa

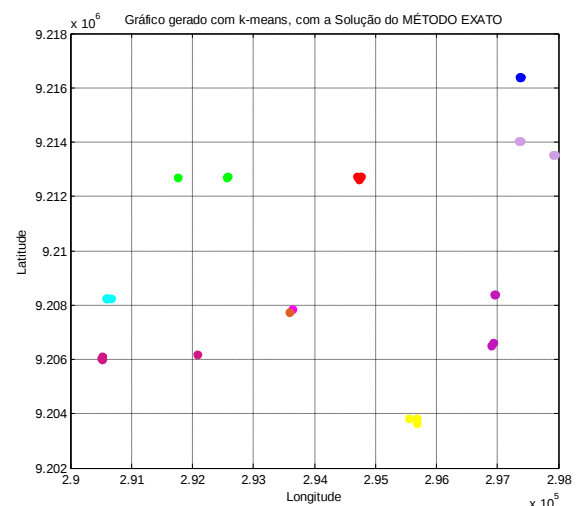


Figura: 6.11- Solução do método Exato

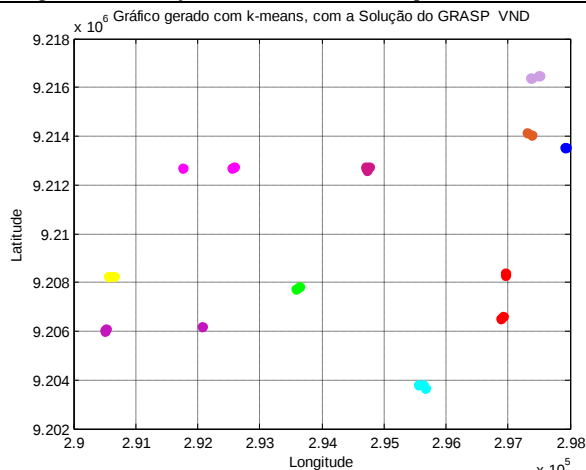


Figura: 6.12 - Solução do método GRASP+VND

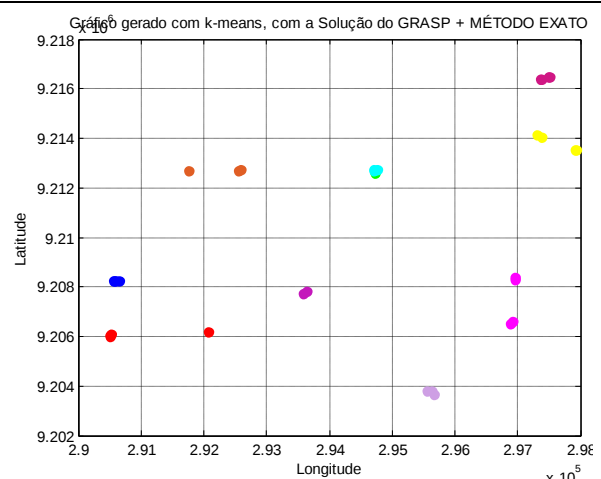


Figura 6.13 - Solução GRASP+ModeloExato

Verifica-se que a solução nas abordagens citadas contém 32 pontos destinados ao posicionamento de viaturas. A solução ótima pode ser vista plotada sobre o mapa de João Pessoa (Figura 6.10) e na Figura 6.11, com a qual é possível fazer uma comparação visual com as soluções obtidas pelas meta-heurísticas híbridas. As Figuras 6.12 e 6.13 exibem, respectivamente, a distribuição espacial da melhor solução apontada para o posicionamento eficiente de viaturas Meta-heurística híbrida GRASP+VND e Meta-heurística híbrida GRASP+MétodoExato. Assim como aconteceu com a instância de 3282 pontos, as soluções obtidas para a instância 4129 pelas diferentes abordagens vislumbram semelhanças entre si, sugerindo a eficácia dos três métodos utilizados para resolver o problema de posicionamento de viaturas no cenário avaliado.

Levando-se em consideração que as soluções apresentadas pelas abordagens adotadas na pesquisa foram muito semelhantes, cujos resultados que apontam a eficácia dos métodos empregados, decidiu-se elaborar um sistema de apoio a decisão espacial para auxiliar o gestor de segurança a definir os melhores locais ao posicionamento eficiente de viaturas na cidade de João Pessoa.

Capítulo 7 - Sistema de apoio a decisão espacial

O sistema de apoio a decisão espacial proposto neste trabalho utiliza a tecnologia WebGIS aplicada ao problema de alocação de viaturas policiais, na cidade de João Pessoa-PB. O software foi construído com reuso de componentes do sistema apresentado em Correia (2010) para otimizar pontos de coletas de urnas. De acordo com Sommerville, (2003 *apud* Ibañez, 2006), o conceito de reutilização de software se baseia na programação modular de um sistema de software com uso de procedimentos, códigos, funções ou classes já criados em contextos diferentes os quais possibilitarão que outros profissionais montem outras aplicações finais. Deste modo, o reuso visa reaproveitar grande parte do software produzido, componentes prontos e testados, o que permite diminuir o custo, aumentar a confiabilidade do sistema e agilidade no desenvolvimento do mesmo. (SOUSA, 2004; VACCARE, 2014).

A ferramenta Web implementada consiste em um protótipo para avaliar as abordagens estudadas na pesquisa. Sendo assim, por se tratar de um protótipo optou-se incluir na ferramenta Web apenas a abordagem exata para otimizar o posicionamento de viaturas em pontos candidatos nos bairros onde foi identificado *hotspot* - Centro e Varadouro. Deste modo, somente foram consideradas 201 pontos de ocorrências e 10 pontos candidatos, dentre os 78 descritos na Seção 5.2.4.

Com base no objetivo proposto nesta pesquisa, buscou-se adaptar o sistema apresentado em Correia (2010) que aborda o problema de p -medianas para o modelo de máxima cobertura de ocorrências policiais. Para tanto, WebGIS foi a ferramenta fundamental porque permite que o usuário consulte e visualize as melhores posições para posicionar viaturas, conforme cenário de ocorrências registradas, dentro do tempo de atendimento sugerido. Através de recursos de WebGIS, também foi possível obter a matriz de origem-distância entre os pontos candidatos e os pontos de incidentes.

7.1 Ferramenta Web para o posicionamento de viaturas policiais

Foi implementada no padrão de uma arquitetura orientada a serviço (*Service Oriented Architecture-SOA*), cujo objetivo é criar módulos funcionais chamados serviços, com baixo acoplamento o que permite a reutilização de código, assim como reutilização de componentes em forma de serviços. Dentre as tecnologias em que a SOA está associada, cita-se: *Web Services*, XML e HTTP - *HyperText Transfer Protocol* (SAMPAIO, 2006).

Neste sentido, a ferramenta Web proposta, conforme descrito em Filho *et al* (2012), é constituída por três camadas a saber: *Facility Location Service*, *Client Layer* e *WebGIS Layer*. (ver Figura 7.1)

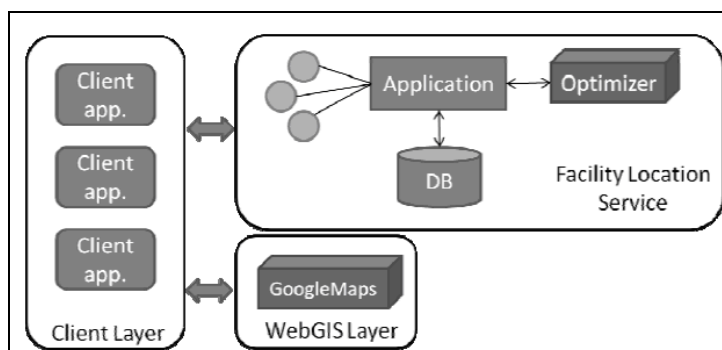


Figura 7.1 - Arquitetura da Ferramenta Web proposta

A resolução do problema de localização de viaturas policiais é executada na camada *Facility Location Service*, a qual é responsável em oferecer este serviço a camada *Client Layer*. Nota-se na Figura 7.1 que a camada *Client Layer*, responsável pela interface gráfica com o usuário (GUI), também está inter-relacionada com a camada *WebGIS Layer*. Em virtude de responder e requisitar serviços oferecidos pelas camadas *Facility Location Service* e *WebGIS layer*, a *Client Layer* torna-se a camada de interação com o usuário que além de disponibilizar a solução encontrada pela camada *Facility Location Service*, permite via Web a visualização de mapas e informações geoespaciais de forma dinâmica, através do *Google Maps*. Além do mais, sabendo-se que a matriz de distância representa um dado de entrada para a resolução do problema de máxima cobertura, adotou-se a camada *WebGIS Layer* para utilizar as ferramentas do *Google Maps* para calcular também a distância (tempo de deslocamento) entre os pontos candidatos e os pontos de ocorrência, além de posicionar pontos geográficos.

7.1.1. Facility Location Service

Ainda na Figura 7.1, observa-se que a camada *Facility Location Service* subdivide-se em três componentes: *Application*, *Optimizer* e Banco de Dados. De acordo com Filho *et al* (2012), quando a camada *Facility Location Service* recebe um pedido para resolver um problema, primeiro é acionado o componente *Application* o qual inicialmente verifica se no banco de dados já existe alguma solução para os parâmetros impostos pelo usuário. No caso de já ter sido armazenada uma solução, a camada *Facility Location Service* apenas encaminha a solução existente para a camada *Client Layer*. No entanto, não existindo solução no banco de dados, o componente *Optimizer* é chamado para resolver o problema de máxima cobertura. A solução ótima é enviada para o componente *Application* o qual, antes de qualquer ação, envia uma cópia da solução encontrada

para o Banco de Dados, depois possibilita que a camada *Facility Location Service* encaminhe a solução para a camada *Client Layer* em resposta a solicitação do lado cliente.

A aplicação foi implementada utilizando a plataforma JEE (*Java Enterprise Edition*). Utilizou-se ainda o framework *Axis* para permitir o uso de *Web Services*.

7.2 Serviço de otimização de posicionamento de viaturas

Na Figura 7.2 é possível visualizar a interface da ferramenta Web para posicionamento de viaturas policiais. Trata de uma aplicação simples, fácil de utilizar. O acesso é realizado no ambiente destinado ao *login*, após identificação do nome do usuário e senha.



Figura 7.2 - Tela de autenticação do usuário

Após a autenticação, o usuário visualizará a tela da Figura 7.3 que apresenta dois mapas da cidade de João Pessoa, sendo que o mapa da direita representa a região que concentra os bairros do Centro e Varadouro, na qual se identificou *hotspot*.

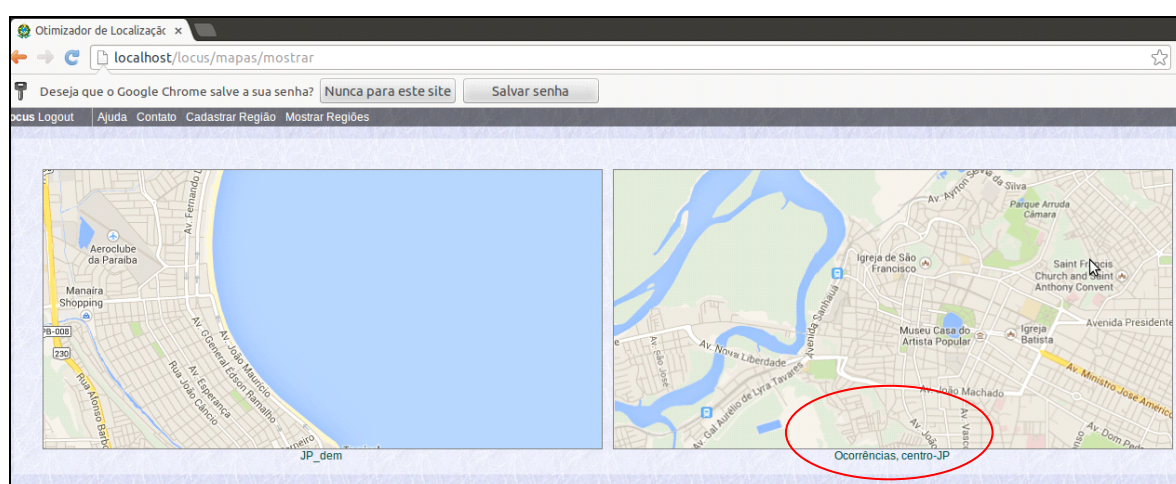


Figura 7.3 - Mapa do Centro e Varadouro

Após clicar na opção "Ocorrências_centro_JP" do mapa da Figura 7.3, o usuário é direcionado para a tela de otimização visualizada na Figura 7.4, na qual é resolvido o problema. Como se trata de uma ferramenta para planejamento, então para implementar a tela de otimização

da Figura 7.4 levou-se em consideração o resultado do procedimento de identificação de *hotspot* (ver Seção 5.1.1). Deste modo, no protótipo foram plotadas as 209 ocorrências registradas nos bairros do Centro e Varadouro e os 10 pontos candidatos da região (obtidos na Seção 5.2.4). O botão Otimizar é responsável para acionar o procedimento de otimização.

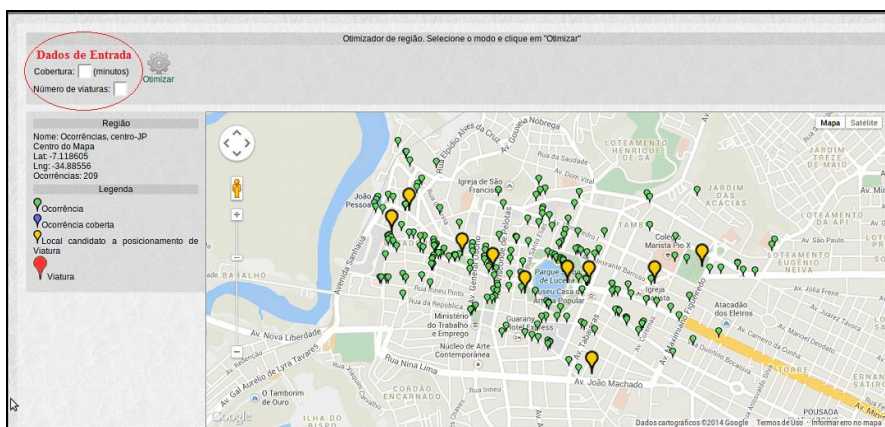


Figura 7.4 - Tela de otimização

O sistema pode auxiliar o gestor de segurança a escolher os melhores locais para posicionar viaturas policiais na região. Sendo assim, os dados de entrada definidos pelo usuário são: tempo considerado para a cobertura (em minutos) e o total de viaturas que deverá ser lançada para cobrir o máximo de ocorrência, dentro do tempo especificado. Para avaliação do sistema de apoio a decisão proposto foram gerados 3 cenários:

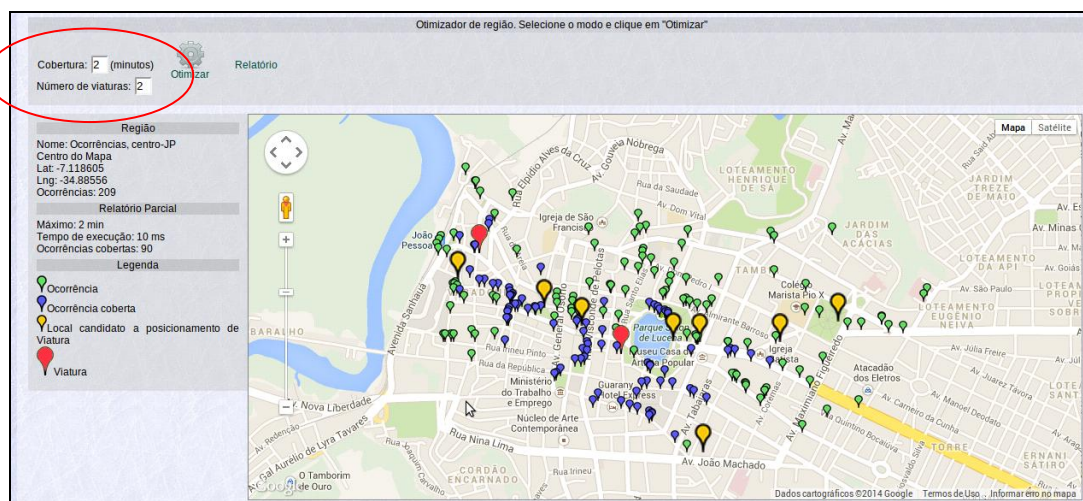
Cenário 1 - Quantidade de viaturas igual a 2 e tempo de cobertura igual a 2 minutos

Cenário 2 - Quantidade de viaturas igual a 4 e tempo de cobertura igual a 3 minutos

Cenário 3 - Quantidade de viaturas igual a 5 e tempo de cobertura igual a 5 minutos

7.2.1 Cenário 1

Para responder a pergunta: "Onde posicionar 2 viaturas para atender o máximo de ocorrência em até 2 minutos ?", o sistema gerou a solução ótima evidenciada na Figura 7.5.



7.5 - Solução ótima para 2 viaturas e cobertura igual a 2 minutos

No cenário 1, em que 2 viaturas devem atender às ocorrências em até 2 minutos, verifica-se na Figura 7.5 que das 209 ocorrências, apenas 90 delas, ficaram cobertas, ou seja, somente 43% do total de ocorrências poderão ser atendidas pela viatura. O tempo de execução para obter a solução ótima foi de 10 milissegundos. Na prática, quando o botão Otimizar é selecionado, a aplicação inicialmente verifica no banco de dados se já existe uma solução para os dados de entradas, caso não encontre uma solução, o otimizador é ativado para resolver o problema de máxima cobertura.

7.2.2 Cenário 2

Na Figura 7.6 exibe-se a solução ótima proposta pelo modelo para o cenário em que o tempo de cobertura corresponde a 3 minutos e o número de viaturas é igual a 4. Nota-se que dos 209 pontos de demanda, 186 deles o equivalente a 89% do total poderão ser atendidos por uma viatura no tempo de até 3 minutos.

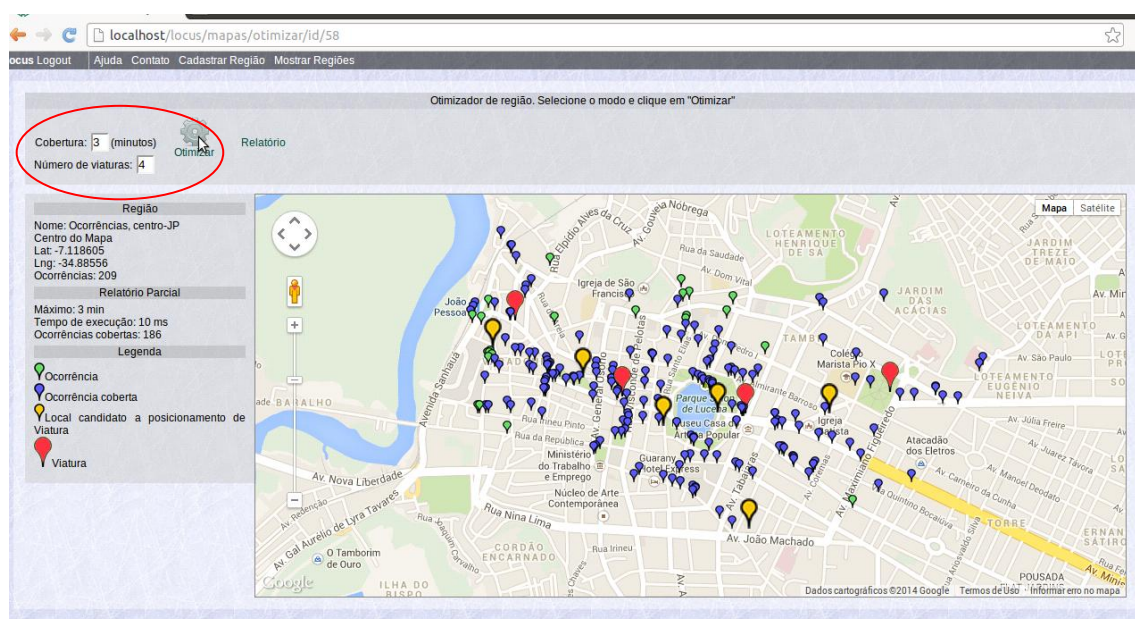


Figura 7.6 - Solução ótima para 4 viaturas e cobertura igual a 3 minutos

Com o *Google Map* foi possível obter o tempo de deslocamento referente ao percurso a ser seguido de um ponto candidato ao posicionamento de viatura a uma ocorrência policial, levando em consideração o sentido da via, conforme normatização municipal. Este recurso aproximou ainda mais a solução ótima da realidade

7.2.3 Cenário 3

É possível observar ainda a análise de sentido de vias no cenário 3 apresentado na Figura 7.7 com tempo de atendimento igual a 5 minutos e o total de viaturas igual a 5.

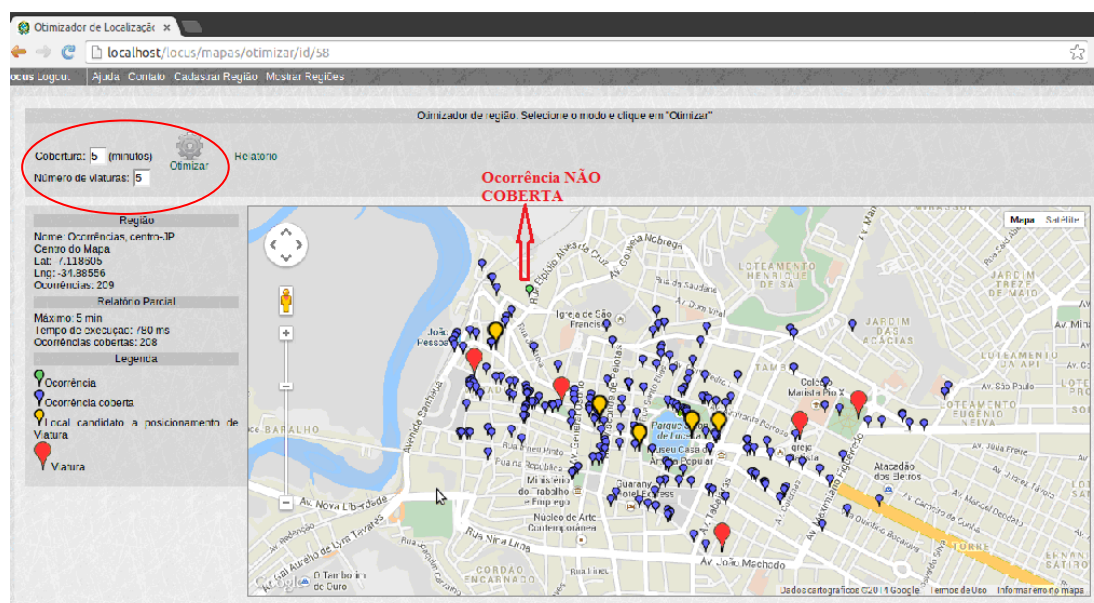


Figura 7.7 - Solução ótima para 5 viaturas e cobertura igual a 5 minutos

Nota-se que apenas uma ocorrência (da parte superior da Figura 7.7) ficou fora do raio de cobertura, embora se observe que o incidente se encontra visualmente mais próximo do local candidato do que outras ocorrências nas imediações. Este fato ocorreu em virtude do sistema Web obter o tempo a partir da API do Google. Deste modo, o tempo de cobertura foi calculado levando em consideração o sentido da via. Sendo assim, no cenário 3, a viatura posicionada naquele ponto candidato não cobriu aquela única ocorrência, justamente porque o tempo de deslocamento do veículo até a ocorrência descoberta seria superior aos 5 minutos definidos pelo usuário para caracterizar a cobertura de uma ocorrência.

Capítulo 8 - CONCLUSÃO

O desenvolvimento de um sistema de apoio a decisão espacial baseado na solução de uma formulação do problema de localização de facilidades para auxiliar no posicionamento otimizado de viaturas operacionais da Polícia Militar foi o objetivo geral desta pesquisa visando minimizar o tempo de atendimento a uma ocorrência emergencial registrada na cidade de João Pessoa.

Neste sentido, para alcançar essa meta foi necessário geoespacializar as áreas geográficas de atuação operacional da Polícia Militar, georreferenciar ocorrências policiais, identificar *hotspots* de crimes, selecionar locais candidatos ao posicionamento de viaturas, formular modelo matemático e implementar meta-heurísticas para obter soluções heurísticas iguais ou aproximadas da solução ótima. Depois, testes foram realizados para avaliar e comparar os tempos de execução e as soluções apontadas pelas abordagens - exata e heurística. Os resultados apontaram eficiência e eficácia dos métodos utilizados para resolver o problema de alocação de viaturas. Deste modo, ciente da qualidade dos resultados obtidos pelos métodos estudados, decidiu-se construir um sistema de apoio a decisão destinado a profissionais responsáveis pela segurança pública na capital paraibana. Assim sendo, foi concebida uma ferramenta WEB para disponibilizar a solução obtida pelo método exato. Trata-se de um protótipo especialmente construído com reuso de componentes do sistema desenvolvido para coleta de urnas do TRE-PB em um processo eleitoral.

Durante a fase dos testes computacionais percebeu-se que em alguns cenários a solução gerada pela meta-heurística. Durante a fase dos testes computacionais percebeu-se que em alguns cenários a solução gerada pela meta-heurística híbrida GRASP combinada com modelo exato coincidiu com a solução exata, tendo como diferença o tempo de resposta que foi muito menor na abordagem aproximada. Desta forma, os resultados dos testes mostram que se pode também utilizar as soluções apontadas pelas duas abordagens, levando em consideração o tipo de planejamento a ser realizado, conforme tipo de serviço oferecido. O tempo de execução será fator importante para o gestor definir a escolha da estratégia adotada, diante de um planejamento de curto, médio e longo prazo do emprego da força policial. No CIOP, por exemplo, o tempo de resposta é fundamental porque tomadas de decisão são sempre em um período curto de tempo, uma vez que se precisa despachar uma viatura para atender uma pessoa que se encontra em situação emergencial. Neste caso, a ferramenta WEB auxiliará o policial a selecionar a viatura mais próxima do local da ocorrência, de forma estratégica. Em outro momento, em que o tempo de resposta não é fundamental, com o sistema o operador de rádio poderá informar os comandantes de guarnições sobre os melhores locais para posicionar as viaturas, após rondas esporádicas ou conclusão de atendimento de ocorrências emergenciais.

As principais contribuições desta pesquisa se concentram nas estratégias definidas para seleção de locais candidatos ao posicionamento de viaturas, formulação de um modelo matemático para o problema de máxima cobertura de ocorrências policiais permitindo o conceito de viaturas *backup*, criação de duas meta-heurísticas que poderão também contribuir para encontrar a melhor solução para localizar veículos operacionais da Polícia Militar principalmente no caso de entradas de dados grande e a implementação de uma Ferramenta Web para auxiliar no processo decisório de onde situar um número fixo de viaturas para atender o máximo de ocorrências policiais dentro do tempo de cobertura também definido pelo usuário.

Nesta pesquisa, 78 pontos candidatos foram selecionados, através de três estratégias distintas: decisão do gestor, modelo de p -medianas e método de clusterização *k-means*. Além da determinação do conjunto de locais candidatos ao posicionamento de viaturas policiais, é preciso avaliar a eficiência e eficácia dos pontos sugeridos, verificando se cobrirão também as áreas com *hotspots* de crimes, identificados previamente.

O emprego do geotecnologias, formulação matemática e meta-heurísticas híbridas se apresentaram como ferramentas valiosas para resolver o problema de localização de viaturas e contribuir no processo decisório na prevenção e combate da criminalidade. Além do mais, o uso de SIG foi fundamental no georreferenciamento das ocorrências, na visualização da distribuição dos pontos candidatos, assim como na identificação de *hotspots* de crimes e resolução do problema de p -medianas. A tecnologia WebGIS possibilitou o desenvolvimento da ferramenta WEB que complementou o estudo de forma dinâmica, permitindo o usuário interagir facilmente com o software e visualizar espacialmente a solução ótima gerada pelo modelo matemático.

Apesar da ferramenta WEB ter sido implementada utilizando apenas a solução ótima obtida pelo modelo matemático, nada impede de se testar e/ou incluir também as soluções encontradas pelas meta-heurísticas as quais apresentaram soluções iguais ou aproximadas da solução exata.

Como sugestões de trabalhos futuros registra-se:

- A necessidade de analisar e testar o modelo matemático com sobrecarga, visto que haverá situações, a exemplo de *hotspot*, em que a concentração de ocorrências será maior que a capacidade de atendimento definida para uma viatura. E nesses casos, o modelo que leva em consideração a sobrecarga será o mais indicado, pois se ajustará melhor para resolver o problema no contexto.
- Ampliação da ferramenta WEB para englobar as ocorrências registradas em toda a cidade de João Pessoa e não apenas em áreas de *hotspot*.
- Apesar do protótipo para Internet ter sido implementado utilizando apenas a formulação matemática da abordagem exata, incluir os procedimentos heurísticos na ferramenta

WEB, uma vez que as soluções encontradas pelas meta-heurísticas coincidiram ou se aproximaram muito da solução ótima, conforme testes realizados.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arakaki, R. G. I. Lorena, L A .** Uma heurística de localização-alocação (HLA) para problemas de localização de facilidades. Prod. vol.16 no.2 São Paulo. 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132006000200011&nrm=iso&tlng=pt, Acessado em: 28/01/2014
- Araz, C., Selim, H., Ozkaraham I.** A fuzzy multi-objective covering-based vehicle location model for emergency services", Computers & Operations Research 34,705-726. 2007
- Arenales, M. Armentano, V. Morabito, R. Yanasse, H.** Pesquisa Operacional, para Cursos de Engenharia. 7ª Edição. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- Aronoff, S.** Geographical Information Systems: A Management Perspective. Ottawa., WDI Publications, 1989.
- Arroyo, J E Cláudio. Marques, T Barroso .** Heurística GRASP aplicado ao problema de alocação de antenas de transmissão. Pesquisa Operacional na sociedade: educação, meio ambiente e desenvolvimento , XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Goiânia, GO. 12 a 15Set. 2006. Disponível em:
<http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/Disciplinas/InteligenciaComputacional/GRASP-AntenasTransmissao.pdf>, acessado em: 19/02/2013.
- Azzoni, C. R.,** 1982, *Teoria da Localização: uma análise crítica*. IPE – USP, São Paulo.
- Bailey, T. C. Gatrell, A. C.** (1995), *Iterative Spatial Data Analysis*. Essex, Longman scientific & technical.
- Ballou, R. H.** Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman. RS.Brasil. 2001.
- Bammi, Deepak,** Systems Engineering Department, University of Illinois at Chicago Circle, P.O. Box 4348, Chicago, Illinois 60680, U.S.A. Available online 19 May 2003. Allocation of police beats to patrol units to minimize response time to calls for service. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054875900222>. Acessado em 20/05/2011.
- Bandyopadhyay, M. Pratap, M.** (2012), Singh Spatial Pattern Analysis for finding Weighted Candidate Set for p-median Problem in Locating Emergency Facilities. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. Volume 2.
- Beato, C. Assunção, R. Andrade, M V e outros.,** Compreendendo e Avaliando: Projetos de Segurança Pública. Editora UFMG. Belo Horizonte. MG. 2008.
- Bennett, V.L, Eaton D., Church R.L.** Selecting sites for rural health workers. *Soc Sci Med* . 16:63-72.1982;

- Bottoms, A M.** *Operations Research And Computers In Law Enforcement: Some Case Studies Of American Police Experience.* Cornput. & Ops. Res. Vol. 1, pp. 49-65. Printed in Great Britain. Pergamon press, 1974.
- Braga A.A.**(2005), *Hot spots policing and crime prevention: A systematic review of randomized controlled trials.* *Journal of Experimental Criminology* 1:317–342.
- Boffey, T.B, Narula, S.C.** *Multiobjective covering and routing problems.* In: Karwan MH, Spronk J, Wallenius J editors. *Essays in decision making: a volume in honor of Stanley Zionts.* Berlin: Springer-Verlag, p. 342-69. 1997.
- Burrough, A.; Mcdonnell, R.** *Principles of Geographical Information Systems.* (New York: Oxford University Press.) 1998.
- Caccetta, L. Dzator, M.** *Heuristic Methods for Locating Emergency Facilities.* In *Proc. Of International Congress on Modelling and Simulation . Western Australian Centre of Excellence in Industrial Optimisation,* Curtin University of Technology, Kent Street, Bentley WA 6102, Australia. pp. 1744- 1750, 2005. Disponível em:
http://www.mssanz.org.au/modsim05/papers/caccetta_2.pdf. Acessado em: 12Fev2013.
- Câmara, G.; Davis.C.; Monteiro, A.M.; D'Alge, J.C.** *Introdução à Ciência da Geoinformação.* 2a. edição, revista e ampliada. INPE, São José dos Campos, Brasil, 2001. Disponível em:
<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/cap1-intro.pdf> . Acessado em: 10Março2013.
- Câmara, G., Carvalho, Marília S.** (2004), *Análise Espacial de Evento.* In: Druck, S. Carvalho, M.S. Câmara, G. Monteiro, A.V.M., Eds, *Análise Espacial de Dados Geográficos.* EMBRAPA,. Brasília. ISBN: 85-7383-260-6.
- Câmara, G. Casanova, M. A.,** Bancos de Dados Geográficos. Curitiba. MundoGEO. 2005.
- Chainey, S. Tompson, L. Uhlig, S.** (2008), *The utility of Hotspot Mapping for Predicting Spatial Patterns of Crime.* *Security Journal*, 21:4–28.
- Chaves, A. A., Biajoli, F. L. Mine, O. M., Souza, M. J. F.**(2007) Meta-heurísticas híbridas para resolução do problema do caixeiro viajante com coleta de prêmios. *Hybrid metaheuristics for solve the prize collecting traveling salesman problem.* Produção. Prod.v.17 n.2. São Paulo.
- Church, R., ReVelle, C.** *The maximal covering location problem,* Paper of the Regional Science Association, 32, 101-118. 1974.
- Church R., Sorensen P., Corrigan W.** *Manpower Deployment in Emergency Services,* Fire Technology, 37, 219-234. 2001.
- Church, R.** *Geographical information systems and location science.* *Computers and Operations Research*, 29 (6) 541-562. 2002.

- Correia, J. H.** Uma ferramenta WEB integrada a métodos híbridos aplicados a problemas de localização. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. CT, UFPB. João Pessoa. Paraíba. Brasil, 2011.
- Costa, C. M. P.** (2010), Localização Óptima do Futuro Hospital de Sintra : Aplicação de Modelos de Location-Allocation no Planeamento de Cuidados de Saúde. Instituto Superior de Estatística e Sistema de Informação. Universidade Nova de Lisboa. Portugal.
- Current, J, O'Kelly M.** *Locating emergency warning sirens. Decisi Sci* ,23:221-34. 1992.
- Curtin, K. Hayslett-McCall, K. L. Qiu, F.** (2010), *Determining Optimal Police Patrol Areas with Maximal Covering and Backup Covering Location Models, Networks and Spatial Economics*, v.10, n.1, 125-143.
- Daskin, M. S.** *Application of an expected covering model to emergency medical service system design. Decisi Sci*, 13:416-39. 1982.
- Drezner, Zvi . Hamacher, H. W.** *Facility Location: Applications and Theory*. Editora: Springer. Berlin. 2002. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=qUT-f95eJ0kC&oi=fnd&pg=PA1&dq=location+teory&ots=zxd3oNT-Cm&sig=Kp7VoBJ819qw8CPifOFN9fj5KzU#v=onepage&q=location%20teory&f=false>. Acessado em 18Fev2013.
- Feo T.A. Resende M.G.C.** *Greedy Randomized Adaptive Search Procedures, Journal of Global Optimization*, 6, pp. 109–133, 1995.
- Francisco, C. N.** Slides da disciplina de Geoprocessamento. Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências. Rio de Janeiro. Brasil. Jan. 2008. Disponível em: <http://www.professores.uff.br/cristiane/Documentos/Geoprocessamento02-2006.pdf> Acessado em: 10Mar2013.
- Figueiredo, J.L.C.T** (2007), *Optimização da localização de armazéns de redistribuição*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia e Gestão, Instituto Superior Técnico, Lisboa,Portugal.
- Filho, G. F. S. Pessoa, B. J. S. Júnior, J. J. L. D. Cabral, L. A. F.** Uma arquitetura e Ferramentas para o Problema de Localização de Facilidades no Setor Público. VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação. São Paulo. SP. (2012)
- Fu, P. Sun, J.** *Web GIS: Principles and Applications . Slides*. ESRI. 2012. Disponível em: <http://www.geog.ucsb.edu/~good/176c/pindefu.pdf> . Acesso em: 10 de janeiro de 2014.
- Galvão, R Diéguez. Nobre, F. F. Vasconcellos, M Murat.** Modelos Matemáticos de localização aplicados à organização espacial de unidades de saúde. *Mathematical location models applied in the spatial organization of health units*. Rev. Saúde Pública vol.33 n.4 São Paulo Aug. 1999. Disponível em: http://www.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-89101999000400014. Acessado em: 12Fev2013.

- Gonçalves, A.** Modelação Geográfica de Problemas de Localização. Tese de Doutorado. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal (2007).
- Gonçalves, D.S.** Metaheurísticas e um Problema de Cobertura de custo único. UNICAMP. (2008) Disponível em: <http://www.ime.unicamp.br/~chico/mt852/douglas2.pdf>. Acesso em: 2 de Fevereiro
- Gonçalves, L. B.** Heurísticas para o Problema de Cobertura de Conjuntos por Pares. Tese de Doutorado. Universidade Federal Fluminense. Niterói. Brasil. 2010.
- Gorr, W L. Lee, Y J.**(2012), *Longitudinal Study of Crime Hot Spots: Dynamics and Impact on Part 1 Violent Crime. Presented at the: 32nd International Symposium on Forecasting*, Boston, USA.
- Hair, J. F. Rolph, A. E. Tatham, R. L. Black, W. C.** Análise Multivariada de Dados, 5 ed, Bookman, Porto Alegre, Brasil, 2005.
- Hakimi, S. L.**(1964), *Optimal locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph*, *Operation Research.*, n. 12, p 450-459.
- Harries, K.D.** (1974). *The Geography of Crime and Justice*. New York, NY.
- Hassin, R. Segev, D.** *The set cover with pairs problem*. In: FSTTCS 2005: *Proceedings of the 25th International Conference on Foundations of Software Technology and Theoretical Computer Science*, vol. 3821, pp. 164–176. Springer, Berlin/Heidelberg, Lecture Notes in Computer Science (2005)
- Hillier, F.S. Lieberman, G.J.** Introdução à Pesquisa Operacional. 8ª Edição. McGraw-Hill. (2006)
- Hogan K, ReVelle C.S.** *Concepts and applications of backup coverage. Manage Sci* , 32:1434-44. 1986
- Ibañez, H. C.** Geomedicina: Sistema de Visualização de fatores ambientais e doenças em mapas na Internet. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Informática. UFPR. Curitiba. 2007.
- Kaveh, P. Zadeh, S. A. Sahraeian, R.** (2010), *Solving Capacitated P-median Problem by Hybrid K-means Clustering and FNS Algorithm. International Journal of Innovation, Management and Technology. Proceedings of the 2010 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Dhaka, Bangladesh, v. 1, n. 4.
- Lima Júnior, E. F.** Uma estratégia contínua para solução de Problemas de localização. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. CT. UFPB. João Pessoa. Brasil. 2006.
- Lorena, L. A. N., Senne, E. L. Paiva, J. A.**(2001), Integração de modelos de localização a sistemas de informações geográficas. *Integration of location models to geographical information systems*, *Gestão & Produção*, São Carlos, v.8, n.2.

Lorena, L. A.N. (2003), Análise Espacial de Redes com Aplicações em Sistemas de informações Geográficas, INPE, São José dos Campos, (www.lac.inpe.br/~lorena/producao/Analiseredes.pdf, 4, 2013).

Lorena, L.A.N. Figueiredo, A.P.S. Localização de Ambulâncias: Uma aplicação para a cidade de São José dos Campos – SP. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, INPE, p-1965-1972. 2005.

Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.20.14/doc/1965.pdf>. Acessado em: 10Jun2013.

MacQueen, J. B. (1967), *Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations*, In: Cam, L.M. L. Neyman, J., editors, *Proceedings of the fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, University of California, USA, v.1, p. 281–297.

Mahajan, M. Nimbhorkar, P. Varadarajan, k. (2009), *The Planar k-Means Problem is NP-Hard*. In: Das, S. Uehara, R., editors, *WALCOM: Algorithms and Computation, Lecture Notes in Computer Science*, Kolkata, India, volume 5431, p. 274–285.

Maniezzo, V. Stutzle, T. Voss, S. Eds. *Matheuristics: Hybridizing Metaheuristics and Mathematica Programming*, vol. 10 of *Annals of Information Systems*. Springer US, New York, 2009.

Mapa, S M S. Lima, R S. (2005) Sistemas de Informação Geográfica (SIG) como ferramenta suporte a estudos de localização e Roteirização. XII SIMPEP – Bauru, SP, Brasil.

Mapa, S. Lima, R. Mendes, J.(2006) Localização de instalações com o auxílio de Sistema de Informações Geográficas (SIG) e Modelagem Matemática, *XXVI ENEGEP*. Fortaleza. Brasil.

Mitchell, P. (1972), *Optimal selection of police patrol beats*, *J Crim Law Criminol Police Sci* 63:577–584.

Oliveira, M G. (2012), Sistema de Localização de Facilidades: Uma abordagem para mensuração de pontos de demanda e localização de facilidades, Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Informática da Universidade Federal de Goiás., Goiânia, GO, Brasil.

Owen, S. H.; Daskin, M.S. *Strategic facility location: a review*. *European Journal of Operational Research*, n.111, p. 423-447, 1998.

Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221798001866> . Acessado em 12Fev2012.

Paluzzi. M. *Testing a heuristic p-median location allocation model for siting emergency service facilities. Paper presented at annual meeting of association of American Geographers*. Filadélfia. Pesilvânia. EUA. 2004.

Peres, F.S. Heurísticas GRASP para o problema de formação de células de manufaturas. Dissertação de Mestrado em Computação. Universidade Federal Fluminense. Niterói. RJ. (2006)

Pizzolato, N. D. Raupp, F. M. P. Alzamora, G. S.(2012), Revisão de desafios aplicados em localização com base em modelos da p -mediana e suas variantes, *SOBRAPO*, Rio de Janeiro, Brasil. v.4, n.1, p. 13-42.

Pozo, A. Freddo, A. R. Brito, R. C. Implementação da Metaheurística GRASP para o Problema do Caixeiro Viajante Simétrico. Tópicos em Inteligência Artificial. Universidade Federal do Paraná. 2009. Disponível em:

<http://www.inf.ufpr.br/aurora/disciplinas/topicosia2/downloads/trabalhos/GraspTSP.pdf>. Acesso em 10 de fevereiro de 2014

PUU, T. (1997), *Mathematical Location and Land Use Theory*. 1ªed. New York: Springer-Verla. EUA.

ReVelle, CS, Hogan K. (1989), *The maximum availability location problem*. *Transport Sci* ; 23: 192-200..

ReVelle, C. S. Eiselt, H.A. (2005), *Location analysis: A synthesis and survey*. *European Journal of Operational Research*, 165. 1–19.

Ribeiro, P. C. F. Um enfoque na localização de facilidades baseado em testes de redução e heurísticas ADD/DROP. Fortaleza. Ceará . Brasil. 2008.

Rodrigues de Oliveira, A. L. Otimização de recebimento e distribuição em unidades armazenadoras de soja. Dissertação de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia. UFPR. Curitiba. 2005. Disponível em : <http://www.ppgmne.ufpr.br/arquivos/diss/141.pdf> . Acessado em: 12 nov 2012

Sampaio, C. SOA e *Web Services* em Java, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2006.

Santos, T. A. Vianna, D. S. Meza, E. B. M. Mesquita da Silva, R. Heurísticas GRASP+VND e ILS+VND para o problema de alocação de pontos de acesso em uma rede em malha sem fio. XXXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Bento Gonçalves. RS. Brasil. outubro, 2012

Silva, G. C.; Ochi, L. S. Martins, S. L. Proposta e avaliação de heurísticas GRASP para o problema da diversidade máxima. *Pesquisa Operacional*. vol.26. nº2. Rio de Janeiro. UFF. Niterói. 2006. Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0101-74382006000200007&script=sci_arttext. Acesso em: 20 de janeiro de 2014

Sher, M. Adler, N. Hakkert, A.S. Ben-Nun A. *The police vehicle location-allocation problem*. *International Conference on Industrial Logistics. "Logistics in a Flat World: Strategy, Management and Operations"* Tel Aviv, Israel . March 9-15, 2008.

Disponível em: <http://lipas.uwasa.fi/~phelo/ICIL2008TelAviv/icil2008telaviv.htm> e <http://lipas.uwasa.fi/%7Ephelo/ICIL2008TelAviv/29.pdf> . Acesso em: 12Fev2013.

Silva, V.F. Cabral, L.A.F, Quirino, R. Estratégia para seleção de locais candidatos voltada ao problema de localização de viaturas policiais. XLV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Natal. RN. Brasil. 2013.

Smith, M, Goodchild, M, Longley, P., (2007), *Geospatial Analysis. A comprehensive guide to principles, techniques and software tools*, The Winchelsea Press.

SPRING - Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas, INPE, São José dos Campos, SP, <http://www.dpi.inpe.br/spring>, 1998.

Sommerville, I. Engenharia de Software. AddisonWesley. Tradução de André Maurício de Andrade Ribeiro e revisão técnica de Keechi Hiramã. São Paulo. 2003

Souza, M. J. F. Inteligência computacional para otimização (cic272). Notas de aula. Disponível em:

<http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/Disciplinas/InteligenciaComputacional/InteligenciaComputacional.htm>. Acesso em: 15/ago/2013.

Souza, M. G. Estudo do desenvolvimento de software baseado em reuso no contexto do ministério da defesa e de seus comandos subordinados. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Computação do Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. RJ. 2004. Disponível em: http://www.comp.ime.eb.br/dissertacoes/2004-Marcelo_Souza.pdf. Acesso em 10 de janeiro de 2014

Vaccare, R.T. Reuso de Software. SCE 186-Engenharia de Software. (slides). Disponível em: <http://www.inf.ufpr.br/silvia/ES/reuso/reuso.pdf> . Acessado em em 06 de janeiro de 2014

Waiselfisz, J. J. Mapa da Violência dos Municípios Brasileiros. Rio de Janeiro. Brasil. 2010

Waiselfisz, J. J. Mapa da Violência dos Municípios Brasileiros . Brasil. 2012.

Weisburd, D. L. Bushway, S. Lum, C. Yang, S. (2004), *Trajectories of crime at places: a longitudinal study of street segments in the city of Seattle*, *Criminology* ,42:283–321.

Weisburd, D. L. Groff, E. R. Morris, N.(2011), *Hotspots of juvenile crime: Findings from Seattle*. National Institute of Justice, Washington, District of Columbia. USA.

Winston, W.L. *Operations Research*. 4.ed. Toronto: Thomson. 2004

Zarandi, M.H, Fazel, D. S., Sisakh, S.A. Haddad. *The large scale maximal covering location problem*. Department of Industrial Engineering, Amirkabir University of Technology. Tehran. Iran. November.2011.

Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1026309811002100> Acessado em : 23/05/2012.

Yeh, A., Chow, M. *An integrated GIS and location-allocation approach to public facilities planning – an example of open space planning*. *Comput., Environ.and Urban Systems*, **20**,(4/5), 339-350. 1996.

10 ANEXOS

10.1 Artigo aceito no XLV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO) - 2013

Segue anexo, o artigo intitulado **Estratégia para seleção de locais candidatos voltada ao problema de localização de viaturas policiais** o qual fora aceito, na modalidade de trabalho completo, pelo Comitê científico do XLV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO), que realizar-se-á na cidade de Natal-RN, no período de 16 a 19 de setembro de 2013.

Estratégia para seleção de locais candidatos voltada ao problema de localização de viaturas policiais

Valtania Ferreira da Silva

UFPB - Prog. de Pós-Graduação em Eng. de Produção
fvaltania@hotmail.com

Lucídio dos Anjos Formiga Cabral

Universidade Federal da Paraíba - Centro de Informática
lucidio@ci.ufpb.br

Roberto Quirino

Universidade Federal da Paraíba - Centro de Informática
quirino.rqn@ci.ufpb.br

RESUMO

Localizar serviços públicos emergenciais se enquadra em um dos problemas clássicos de otimização onde pontos candidatos são disponibilizados para que sejam escolhidos, dentre eles, aqueles que otimizem o critério de eficiência estabelecido, visando localizar um número limitado de facilidades. O conjunto de locais candidatos tem grande influência sobre a solução final gerada por um modelo de localização. Sendo assim, neste artigo descreve-se uma abordagem para encontrar um conjunto de locais candidatos ao posicionamento de viaturas policiais, baseada em três estratégias: decisão do gestor de segurança, modelo de P-mediana e método de clusterização *k-means*. Inicialmente, foi identificada a presença de *hotspots* de crimes. No SPRING foram gerados os *hotspots*, assim como resolvido o problema de P-mediana. Com apoio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) foi possível também georreferenciar as ocorrências de crimes e visualizar a distribuição dos locais candidatos selecionados.

PALAVRAS CHAVE. P-mediana, *K-means*, localização de viaturas policiais

Área principal (AdP - PO na Administração Pública, SE - PO em serviços)

ABSTRACT

Locating public emergency service into one of the classic problems of optimization, in which candidates points are available to be chosen, among them, those that optimize the efficiency criteria established. The candidate set of locations have great influence on the final solution generated by a model of *facility location*. Therefore, this article describes an approach to find a set of candidate locations to the positioning police cars, based on three strategies: decision of the security manager, model P-median and clustering method *k-means*. First, to identify the presence of hotspots of crime is essential. After, hotspots and the p-median problem were resolved in SPRING. With the support of Geographical Information Systems (GIS) was also possible to georeference the data and visualize the distribution of local candidates selected.

KEYWORDS. P-mediana, *K-means*, patrol location

Main area (AdP - OR in Public Administration, SE - OR in Services)

1. Introdução

Serviços públicos emergenciais, tais como segurança pública, defesa civil e serviços médicos, possuem em comum o objetivo de atender a população em um menor espaço de tempo possível, já que visam salvar vidas e coibir crimes. De um modo geral, a operacionalização desses serviços consiste na disponibilização em pontos fixos de veículos (recursos limitados), os quais ficam subordinados a uma

Central de Despacho para serem acionados, mediante uma solicitação da comunidade. Neste sentido, a eficiência e eficácia do serviço emergencial gira em torno do melhor posicionamento de veículos (viaturas), visando diminuir o tempo de resposta.

Um dos problemas clássicos de otimização é onde situar bens ou serviços, de modo que atendam a demanda, com algum critério de eficiência, como distância ou tempo de resposta. Localizar serviços públicos emergenciais se enquadra nesse tipo de problemas que na literatura é conhecido como localização de facilidades (*facility location*). Nestes problemas, diversos pontos candidatos são disponibilizados para que sejam escolhidos, dentre eles, aqueles que otimizem o critério de eficiência estabelecido. Eleger antecipadamente os possíveis locais candidatos para posicionar facilidades é fundamental durante o planejamento para evitar insucesso, prejuízo ou insatisfação de clientes. Nesta fase prévia, diversas estratégias podem ser adotadas, dentre elas: opinião de especialista, decisão do gestor, problema de p-medianas e técnicas de clusterização de dados *k-means* (LORENA, 2001; REVELLE, 2005; COSTA, 2010; KAVEH et al, 2010; BANDYOPADHYAY, 2012; OLIVEIRA, 2012). Além do mais, identificar as áreas nas quais a concentração da demanda é maior, representa uma estratégia muito importante para auxiliar o gestor no direcionamento das ações focadas nesse espaço geográfico. A visualização da distribuição espacial dos locais candidatos sugeridos é possível com apoio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), o qual tem sido uma ferramenta aceitável para integração de problemas de localização, análise espacial de pontos e geração de mapas.

Uma das dificuldades encontradas para resolver problemas de localização de facilidades, consiste na determinação ótima dos locais candidatos, justo porque o conjunto desses pontos selecionados reflete diretamente na qualidade da solução apontada pelo modelo de localização de facilidades. Neste sentido, esta pesquisa tem como objetivo utilizar estratégias para seleção de locais candidatos ao posicionamento otimizado de viaturas operacionais, em João Pessoa-PB, para de forma eficaz e eficiente, inibir a prática de atos delituosos e reduzir o índice de criminalidade.

O artigo está organizado em cinco seções, sendo que na seção 2 e 3 foram apresentados os conceitos teóricos de p-medianas, *k-means*, interpolador *kernel*, SIG e SPRING. Os resultados e discussão estão na seção 4, com a visualização espacial da distribuição dos locais candidatos.

2. Seleção de locais candidatos

Localizar facilidades em uma área geográfica limitada (cidade, bairro), pertence a uma relevante classe de problemas de Pesquisa Operacional, que busca decidir, dentre um conjunto de locais candidatos, quais os melhores pontos para situar uma facilidade, de maneira que seja otimizada uma medida de utilidade, obedecendo diversas restrições, como tempo de resposta, para possibilitar a operação eficiente do sistema produtivo (PIZZOLATO, 2012; LORENA, 2003; REVELLE, 2005). Uma das primeiras providências a ser tomada, quando se deseja posicionar facilidades, é definir o espaço onde as facilidades serão localizadas. Isto porque, segundo ReVelle (2005), frequentemente, a região geográfica é utilizada para definir a categoria do problema de localização e o algoritmo empregado para resolvê-lo. Nos modelos discretos, além das facilidades serem posicionadas, elas devem ser localizadas conceitualmente, em apenas um número finito de pontos eleitos no plano ou na rede. Assume-se também que a demanda e as facilidades estão localizadas nos nós de uma rede, em um conjunto limitado de posições que podem ser representados em um grafo, através de vértices.

Ainda para ReVelle (2005), nos modelos de localização discreta existe uma fase de pré-processamento adicional, para que sejam previamente selecionados os locais candidatos, nos quais as facilidades podem ser localizadas. Neste sentido, é considerada etapa fundamental para a qualidade da solução apontada pelo modelo. Sendo assim, durante esta fase preliminar, técnicas e métodos diversos podem ser utilizados para seleção de um conjunto de pontos possíveis para sediar facilidades. Pesquisas apontam o uso de: problema de p-medianas (LORENA, 2001; BANDYOPADHYAY, 2012), técnica de clusterização *k-means* (KAVEH et al, 2010; OLIVEIRA, 2012), critérios adotados pelo gestor e sugestão de especialista (COSTA, 2010). O importante é que no momento da decisão para posicionar as facilidades já se tenha propostas de vários locais candidatos os quais deverão ser analisados e comparados, mediante os critérios adotados, para serem escolhidos como os melhores pontos de instalar equipamentos.(LORENA, 2003).

2.1 Problemas de p-medianas

O modelo de p-medianas, formulado por Hakimi, (1964), é um problema clássico de localização de facilidades. Tem como objetivo encontrar a localização de P centros (medianas) mapeados em uma rede, de modo que seja minimizada a soma das distâncias de cada vértice ao centro mais próximo. No final,

todas as p-medianas encontradas representarão os pontos para localização das P facilidades que se almeja distribuir no espaço geográfico.

A seguir, o problema de p-medianas será formalmente enunciado. Seja um grafo $G = (V, E)$, onde V representa um conjunto finito e não vazio de vértices (pontos de demanda), enquanto E , representa um conjunto de ligações entre os vértices, compostas por pares ordenados de elementos distintos de V . Encontrar um subconjunto de vértices de V ($V_p \subseteq V$), de maneira que $V_p = P$, onde P pode ser variável ou fixo, de tal forma que a soma das distâncias de cada vértice restante em V , até seu vértice mais próximo em V_p , seja a menor possível.

De acordo com Lorena (2001), os problemas de P-medianas podem ser modelados como problemas de programação inteira 0-1. Além do mais, sem perda de generalidade, considerou-se que as medianas são escolhidas do próprio conjunto de vértices apontado no problema. Neste sentido, a formulação do modelo matemático para problemas de P-medianas sem restrições de capacidade, é dada por:

$$v(P) = \text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$P \text{ sujeito a: } \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{jj} = P \quad (3)$$

$$x_{ij} \leq x_{jj}, \quad \forall i, j \in N, i \neq j \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in N \quad (5)$$

Onde $N = \{1, \dots, n\}$, sendo N o número de vértices na rede; P é o número de centros (medianas) a serem localizados; $D = [d_{ij}]_{n \times n}$, com $d_{jj} = 0$, para todo $j \in N$ é uma matriz de custo (distância) e $X = [x_{ij}]_{n \times n}$, a matriz de alocação, com:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o vértice } i \text{ é atendido pelo centro } j, i \neq j; \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

e

$$x_{jj} = \begin{cases} 1, & \text{se o vértice } j \text{ é um centro;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

As restrições (2) e (4) garantem que cada vértice i é alocado a somente um centro j , que deve ser uma mediana. A restrição (3) determina o número exato de medianas a serem localizadas (P), e (5) corresponde às condições de integralidade.

2.2 Técnicas de clusterização *k-means*

Apresentado por McQueen (1967), *k-means* é um dos mais simples algoritmos de agrupamento, não supervisionado que não precisa ser parametrizado e nem acompanhado. O problema de *k-means* será apresentado formalmente a seguir, conforme (MAHAJAN, 2009). Dado um conjunto finito $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ de pontos de demanda, em R^m , e um inteiro $k \geq 1$. Deve-se construir k grupos (*cluster*), de modo que os objetos alocados a cada um dos k cluster sejam similares entre si, segundo alguma função objetivo. Para tanto, deseja-se encontrar os k pontos (centróides) de um conjunto de k centróides, dado por $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$, de maneira a minimizar a soma das distâncias quadradas euclidianas, entre cada ponto de demanda em X e o respectivo centróide k . A idéia principal é definir k centróides, para cada k *cluster* de um conjunto de dados que denotam um padrão ou classe. Um centróide é um ponto central em

relação a um conjunto de outros pontos que compõem um *cluster* (aglomerado). Neste sentido, a função de custo a ser minimizada, de modo bem simplificada, sem restrições, baseada em (HAIR et al., 2005) e (OLIVEIRA, 2012) pode ser formulada como:

$$\text{custo}(k\text{means}) = \sum_{k=1}^k \sum_{x_i \in C_k} d(x_i, x_{0k})$$

Onde x_{0k} é o centróide do *cluster* c_k e $d(x_i, x_{0k})$ é a distância entre os pontos x_i e x_{0k} .

Por outro lado, o algoritmo *k-means* procede conforme os passos seguintes:

1. Selecionar k centróides randomicamente, como centróides iniciais de k *cluster* (Solução Inicial)
2. Alocar cada ponto da demanda ao centróide mais próximo. Depois os centróides devem se mover para o centro dos *clusters*, de tal modo que k novos *cluster* serão criados.
3. Para cada k novos *clusters* criados, recalcular novos centróides para possibilitar nova alocação de pontos de demanda ao centróide mais próximo.
4. Repetir os passos 2 e 3, até que quando não existir mais mudanças na alocação dos centróides aos pontos de demanda. Algoritmo pára (KAVEH, 2010).

3. Sistema de Informação Geográfica

Sistema de Informação Geográfica (SIG), de acordo com Câmara (2005, p.12), é o termo aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos, tendo as principais características “inserir e integrar, numa única base de dados, informações espaciais”, além de “oferecer mecanismos para combinar as várias informações, através de manipulação e análise, bem como para consultar, recuperar e visualizar o conteúdo da base de dados geográfica”.

Os modelos de localização, assim como os SIGs, são considerados sistemas de apoio a decisão espacial que têm como atributos em comum, dados espaciais correspondentes a posições geográficas, representadas por um par ordenado (x, y) de coordenadas espaciais. Devido a capacidade de integrar diversas técnicas para o tratamento de informação espacial, os SIG são fundamentais em problemas de localização, para georreferenciar e, conseqüentemente, possibilitar a visualização da distribuição espacial das facilidades. Sendo assim, o uso de SIG pode contribuir para a rápida percepção visual de informações geográficas que não estavam evidentes, ampliando o entendimento de especialistas e usuários (LORENA, 2001; MAPA, 2006; CURTIN et al, 2010). Geralmente, o problema de localização é resolvido por métodos e software diversos, enquanto a visualização dos dados se processa com uso de SIG (COSTA, 2010). No entanto, em Lorena(2001) há relatos da integração de SIG e problemas de localização para resolver problemas de P-medianas.

3.1 Integração de SIG e problemas de p-medianas

A integração de SIG e técnicas de Pesquisa Operacional para resolver problemas de localização, ainda não está totalmente difundido na comunidade científica internacional. Entretanto, no trabalho de Lorena (2001) é apresentado um algoritmo que possibilitou a integração do problema de P-medianas aos SIGs: ArcView (da ESRI) e SPRING (INPE). Trata do algoritmo que reflete uma abordagem da heurística lagrangiana/surrogate, na qual a viabilização da solução dual é feita através de uma heurística de localização-alocação alternada. Este algoritmo foi integrado ao sistema de informações geográficas SPRING (versão 3.5), no ano de 2001, durante a realização do GisBrasil, em Curitiba. A interface de integração com o SPRING se deu através de um método criado, que atua na representação vetorial dos modelos de rede, temático e cadastral daquele SIG.

Visando avaliar a eficiência do algoritmo de P-medianas integrado ao SPRING, Lorena (2001) realizou alguns testes computacionais, com dados do município de São José dos Campos, variando até o máximo de 3282 vértices e 1141 centros, para o caso sem restrições de capacidade. No estudo, Lorena (2001) simula alguns objetos localizados em vértices da rede, como sendo possíveis pontos para instalação de "algum tipo de atividade". A solução final identificou os quatro melhores locais para posicionar facilidades. Como Lorena (2001) tratou o tipo de atividade a ser posicionada, de forma genérica, vislumbra-se que o modelo de P-medianas integrado ao SPRING, também pode ser utilizado para resolver problemas de várias áreas do conhecimento, inclusive na segurança pública, para localizar viaturas policiais.

O SPRING (Sistema para Processamento de Informações Georreferenciadas) é um banco de dados geográfico de 2º geração, de domínio público, que pode ser adquirido gratuitamente, através do endereço <http://www.dpi.inpe.br/spring>. Tem por objetivo a integração e análise de diferentes tipos de dados espaciais

(vetoriais e matriciais), assim como, integrar tecnologias de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica (SPRING, 1998).

3.2. SPRING e Interpolador de Intensidade *kernel*

Muitos fenômenos, a exemplo de crimes, podem ser representados através da distribuição espacial das ocorrências, expressas como pontos localizados no espaço. Em uma distribuição de pontos no espaço, o número de ocorrências computadas por unidade de área é denominada de intensidade ou densidade (CÂMARA, 2004). No entanto, a constatação de um número acima do esperado, excessivamente próximos, dessas ocorrências investigadas por unidade de área, simboliza a presença de aglomerados (*cluster*) na distribuição espacial. Sendo assim, a análise exploratória de um evento pontual começa pela estimação da intensidade do fenômeno, visando detectar aglomerados espaciais. Estas estimativas são calculadas, através de interpolações, por métodos diversos, tais como o estimador de intensidade *Kernel*, o qual possibilita a estimação da intensidade do evento, em toda a região de estudo, inclusive nos locais onde o processo não tenha gerado nenhuma ocorrência real. Esses conceitos são muito utilizados para identificação de zonas quentes de criminalidade (*hotspots*), já que segundo Beato (2008), o "estado da arte da análise espacial de crimes utiliza mapas de superfícies de *Kernel*".

De acordo com Câmara (2004), o estimador de intensidade *Kernel* para fazer interpolações "ajusta uma função bi-dimensional k sobre os eventos considerados, compondo uma superfície cujo valor será proporcional à intensidade de amostras por unidade de área". Essa função k de estimação, com propriedades de suavização do fenômeno, contabiliza o número total de pontos contidos dentro de uma região de influência que possui raio de tamanho τ .

A definição formal do estimador *kernel* é apresentada a seguir. Dados $u_1, u_2, \dots, u_n$ como sendo o conjunto de localizações de n eventos observados em um região A e que u representa uma localização genérica cujo valor deseja-se estimar. A intensidade pode ser estimada, através da fórmula geral do estimador de intensidade:

$$\hat{\lambda}_\tau(u) = 1/\tau^2 * \sum_{i=1}^n k(d(u_i, u)/\tau)$$

Onde $d(u_i, u)$ é a distância entre o ponto u a estimar e a posição da observação u_i do evento, a qual deve ser menor ou igual ao raio τ , ou seja, $d(u_i, u) \leq \tau$. Verifica-se ainda que o estimador *Kernel* depende de dois parâmetros: o raio de influência τ (que é definido pelo analista) e a função k de estimação com propriedades de suavização do fenômeno. No Estimador de Densidade por *Kernel* do SPRING, a função de interpolação utilizada para k é (BAILEY e GATRELL, 1995):

$$K(h) = 3/\tau(1-h^2)^2$$

Onde h é a distância entre a localização u a ser estimada e os eventos observados - $d(u_i, u)$.

4. Discussão e Resultados

Nesta seção serão apresentadas as estratégias adotadas para seleção de locais candidatos a posicionamento de viaturas policiais. O estudo foi realizado na cidade de João Pessoa, capital da Paraíba-Brasil, que possui 64 bairros, distribuídos em uma área territorial de 211 km². Os dados utilizados correspondem a 1.492 ocorrências de Crimes Contra o Patrimônio, cedidos pela Polícia Militar e registrados nos meses de janeiro e fevereiro de 2013, pelo Centro Integrado de Operações Policiais (CIOP). Na Figura 1, visualiza-se a distribuição espacial dessas ocorrências, que dentre os crimes computados, estão: Roubo a Pessoa, Roubo em Transporte Coletivo, Roubo em Posto de Combustível, Furto em residência, Furto de veículos, extorsão, estelionato, dentre outros.

Os software de SIG utilizados na pesquisa foram: Google Maps (para obtenção das coordenadas geográfica - latitude e longitude, através de endereços e pontos de referência, das ocorrências e pontos de visibilidade), o MapInfo Professional, versão 7.0 (para gerar os mapas de pontos de ocorrências e mapas temáticos de locais candidatos) e o SPRING (para gerar mapas de *Kernel* e resolver o problema de p -medianas). Ainda foi empregado o algoritmo de clusterização *k-means*, existente no MatLab R2010b, versão 7.11.0.584, para gerar os centróides de cada k -cluster, os quais foram incluídos no mapa temático dos locais candidatos para posicionar viaturas.

O estudo visa auxiliar os gestores de segurança pública na adoção de políticas para redução e inibição da criminalidade, de forma eficiente e eficaz, com o emprego de viaturas policiais em locais estratégicos. Por isto, em todo o estudo levou-se em consideração as ocorrências dos crimes pontuados.

Porém, antes da eleição dos pontos, buscou-se inicialmente verificar a existência de *hotspots* de crimes cujo resultado servirá de parâmetro para nortear as decisões na etapa seguinte que trata realmente da seleção do conjunto de locais candidatos, a qual ocorrerá por meio de três estratégias: decisão do gestor de alto escalão, modelo de P-medianas e *k-means*.

4.1. Identificação de *Hotspots*

Uma das técnicas utilizadas para o combate da criminalidade tem sido o delineamento das chamadas zonas quentes de criminalidades (*hotspots*) ou áreas com grandes concentrações de crimes (BEATO, 2008). Os *hotspots* são pequenas áreas com intensidades elevadas de criminalidade. Tipicamente, representam cinco por cento ou menos da área de uma cidade, mas que concentram um percentual em torno de 50 por cento ou mais dos crimes (CHANEY et al, 2008; WEISBURD et al, 2004; WEISBURD et al, 2011). Desta forma, estas zonas quentes devem ser vistas como bons alvos para a prevenção de crimes (GORR et al, 2012). Identificar essas áreas pode ajudar a polícia a direcionar os esforços nos locais onde são mais necessários, otimizando desta forma, o efeito da presença da força policial. Além do mais, estudos experimentais, em Braga (2005), têm mostrado considerável redução da criminalidade quando as polícias atuam nessas áreas de criminalidade, direcionando mais recursos operacionais e táticas inovadoras para o enfrentamento ao crime. Identificar *hotspots*, significa encontrar clusters ou aglomerados de crimes, numa distribuição espacial do fenômeno.

Para verificação de *hotspots* de crimes, utilizou-se o arquivo contendo as coordenadas geográficas das ocorrências de Crimes Contra o Patrimônio da Figura 1, o qual foi importado para o SPRING, no modelo de dados cadastral. Com o estimador de densidade *Kernel* foi gerada a superfície de intensidade, representada na Figura 2. Por simples inspeção visual, claramente, é possível identificar a presença de um *hotspots* crônico (GORR et al, 2012) de crimes, no Centro da cidade e um outro em menor intensidade, nas proximidades dos bairros Manaíra e Tambaú. De acordo com GORR et al (2012), registra-se *hotspot* crônico em áreas comerciais, nas quais é maior a concentração de pessoas que lá vão, temporariamente, por questões de trabalho ou negócio, mas não moram. Deste modo, o mapa de *kernel* da Figura 2 sugere que, dentre os 64 bairros de João Pessoa, o Centro requer a presença de um número maior de viaturas para a prevenção e inibição da incidência de Crimes Contra o Patrimônio, naquela região. Assim como, nas proximidades de Manaíra e Tambaú, bairros de concentração maior de turistas e com população de renda mais elevada, quando comparados a outros bairros, a exemplo do Centro.

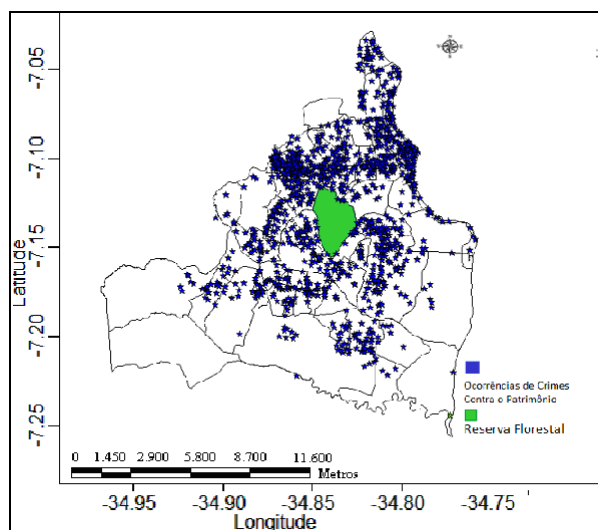


Figura 1 - Distribuição espacial de Crimes Contra o Patrimônio

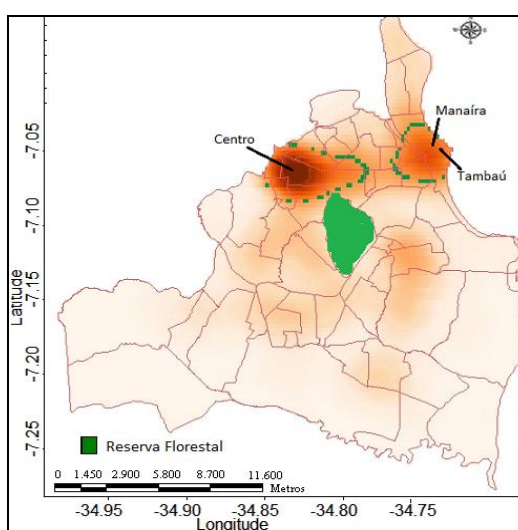


Figura 2 - Mapa de Kernel com *Hotspots*

Como o mapa de *Kernel* não quantifica (Figura 2), não resolve o problema, apenas aponta aonde o fenômeno apresenta maior concentração, cabe ao gestor investigar melhor o problema naquela área, adotando medidas táticas e operacionais. Deste modo, após ter noção geral do comportamento do fenômeno criminal na cidade, segue-se para a etapa de eleger locais candidatos, conforme estratégias adotadas.

4.2. Estratégias para Seleção de Locais Candidatos

As estratégias adotadas para seleção de pontos candidatos foram: decisão do gestor de alto escalão, p-medianas e *k-means*. Essas três estratégias foram utilizadas, de forma paralela e complementar, justo porque as soluções apontadas por cada uma delas farão parte do conjunto universo composto por 78 locais candidatos, de modo que cada uma das estratégias irá contribuir com 26 pontos, no modelo proposto para localização de viaturas policiais.

4.2.1. Decisão do gestor de alto escalão

A decisão locacional de viaturas, aprovada pelo Comandante Geral da Polícia Militar, foi traduzida no Plano de Operação intitulado Ponto de Visibilidade Operacional (POVO) que tem como meta a redução em 10% (dez por cento) dos Crimes Violentos Letais Intencionais (CVLI) e de Crimes Violentos Contra o Patrimônio (CVP). A atividade operacional para implementação do plano POVO se revela no posicionamento de viaturas operacionais em logradouros públicos, considerados pontos de visibilidade operacionais e estratégicos, da cidade de João Pessoa. Dentre os objetivos, considerados prioridade de comando, que influenciaram na escolha dos 26 locais geográficos na capital paraibana para posicionar viaturas operacionais, cita-se: inibição da criminalidade (através da demonstração de força), proporcionar sensação de segurança em locais de maior movimentação de pessoas e servir de ponto de referência ao cidadão que necessitar dos serviços da Polícia Militar, em eventuais situações de emergência.

De posse da relação dos pontos de visibilidade eleitos pelo gestor (com endereço e ponto de referência), foram geradas as coordenadas geográficas no Google Maps. Em seguida, no MapInfo, as localidades foram georreferenciadas, gerando-se os 26 pontos de visibilidade operacional (POVO) apontados na Figura 3. Verifica-se que a concentração maior de pontos (20), o equivalente a 77%, se encontra na zona norte da capital paraibana.

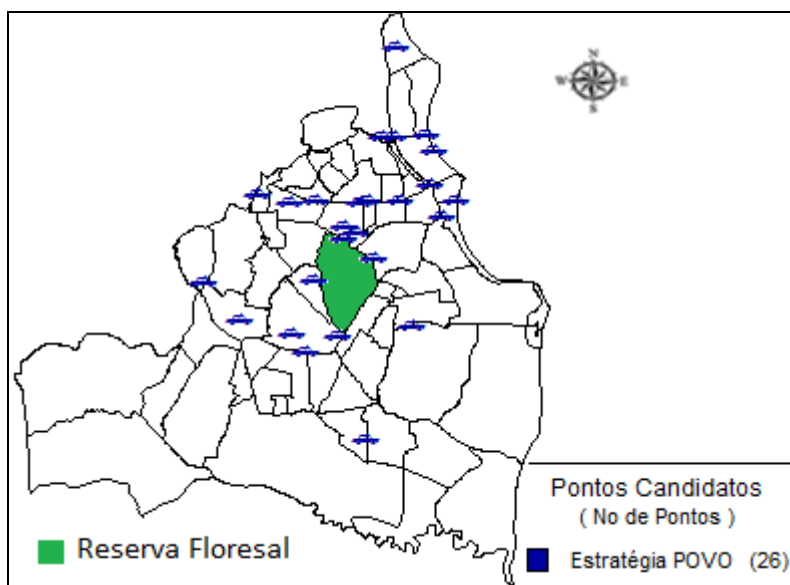


Figura 3 - Mapa de Distribuição dos Pontos POVO

4.2.2. Modelo de p-mediana

Em Mitchell (1972), verifica-se uma aplicação testada em Anaheim, Califórnia-EUA, que utiliza o modelo de p-medianas com o propósito de minimizar a distância total percorrida por uma patrulha policial para atender chamadas emergenciais. Por outro lado, Bandyopadhyay (2012) aborda o problema de p-medianas para determinar localizações de facilidades emergenciais, após a identificação de *hotspots*. Enquanto, Curtin et al (2010) enfatizam que o problema de p-medianas pode ser melhor empregado para segmentação dos *hotspots* de crime. Já Lorena (2001) relatou a efetividade do modelo de p-mediana integrado ao SPRING, para situar facilidades, em "algum tipo de atividade", o que motivou o uso desta ferramenta, na fase de seleção de locais candidatos a posicionamento de viaturas policiais. Diante desse contexto e com base no estudo de Lorena et al (2001), optou-se pelo algoritmo de problema de p-medianas

integrado no SPRING, como estratégia para também se eleger pontos candidatos. Levando em consideração, que na estratégia anterior foram definidos 26 pontos de visibilidade, decidiu-se também adotar este quantitativo no problema de P-medianas.

Desse modo, de posse das ocorrências de crimes no formato de dados cadastral, através da opção Localização de Medianas, no menu Cadastral do SPRING localizou-se 26 medianas, cujos centróides estão apresentados na Figura 4, em forma de círculos. Para o cálculo das medianas foi utilizada a distância linear proposta pelo modelo.

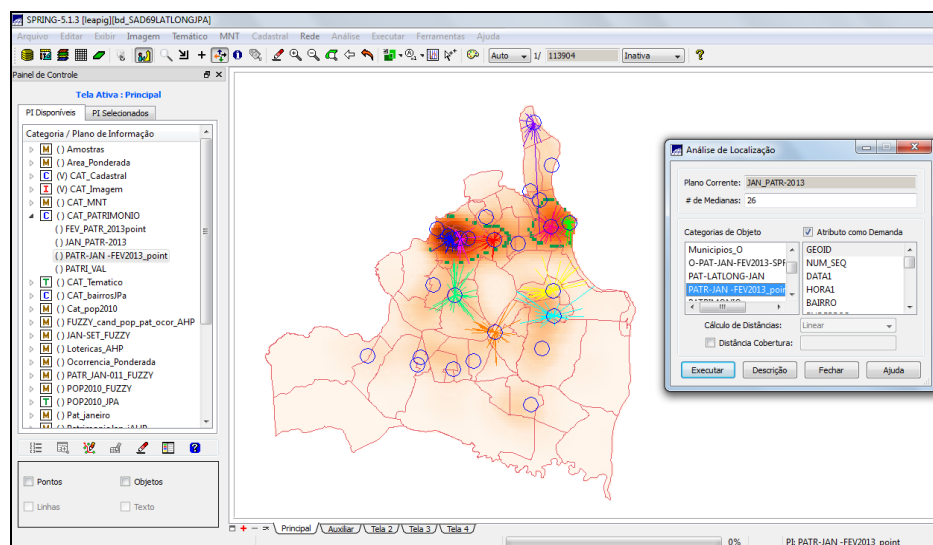


Figura 4 - Mapa de 26-medianas geradas no SPRING

No Centro da cidade, área onde se registrou um *hotspots* crônico, foram geradas 4 medianas, o que corresponde a quatro locais candidatos para posicionar viaturas naquela área.

4.2.3. Uso da técnica de agrupamento *k-means*

De acordo com Oliveira(2012), o problema de localização de k facilidades pode ser sintetizado em localizar os k centróides no plano, de modo que o problema de posicionar facilidades pode ser resolvido de uma maneira relativamente rápida pelo método *k-means*. Sendo assim, os centróides gerados pelo *k-means*, nesta abordagem, serão também considerados como locais candidatos para situar viaturas. Para tanto, como nas duas estratégias anteriores, também serão definidos 26 pontos candidatos (centróides) para contribuírem com a solução final. Deste modo, para gerar os 26 centróides utilizou-se o algoritmo *k-means* do Matlab. A matriz de entrada de dados é formada pelas coordenadas (latitude e longitude) das ocorrências de Crimes Contra o Patrimônio apresentadas na Figura 1. O método utilizado para escolher as posições iniciais dos centróides foi o *default sample*, o qual inicialmente seleciona randomicamente k observações do conjunto de entrada. Admitiu-se 10 repetições de clusterização, de maneira que em cada uma delas, o *k-means* gerava um novo conjunto de posições iniciais dos centróides. A solução final gerada pelo *k-means*, contendo 26 clusters e respectivos centróides, está exibida na Figura 5.

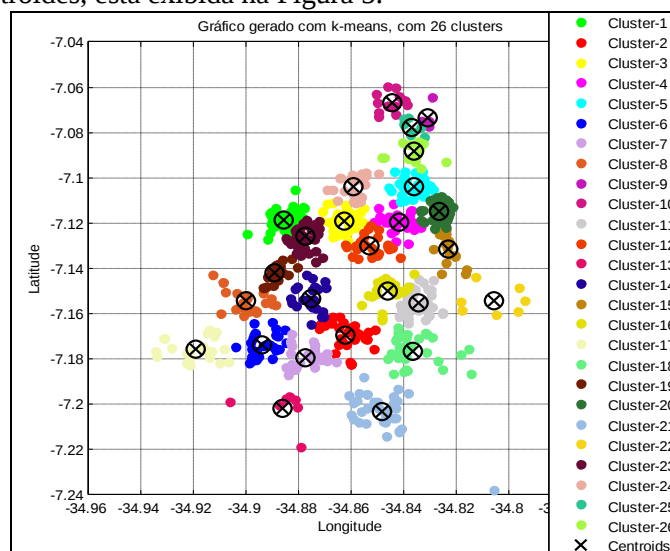


Figura 5 - Distribuição de 26 clusters e respectivos centróides

Verifica-se que ao contrário dos pontos gerados pela estratégia P-medianas, na qual os 26 pontos candidatos foram eleitos do próprio conjunto de crimes georreferenciados, na estratégia *k-means*, pela própria característica do método, nenhum dos 26 centróides coincidiram com qualquer posição do conjunto de ocorrências (Figura 1), a exemplo do centróide-22 da Figura 5. No entanto, é representativa a solução do *k-means*, pois no contraponto do mapa da distribuição espacial dos crimes, percebe-se que a geração dos 26 centróides foi, na maioria, em locais onde ocorreu a maior concentração de crimes. Nota-se ainda nas zonas de *hotspots*, a presença de 2 centróides no Centro e 1 nas proximidades de Tambaú e Manaíra.

4.3 Locais candidatos

O resultado final da seleção de locais candidatos corresponde ao conjunto composto por 78 posições geográficas, fruto do somatório dos 26 pontos gerados em cada uma das três estratégias declaradas: decisão do gestor, P-medianas e *k-means*. No mapa temático da Figura 6, verifica-se os 78 locais candidatos a situar viaturas policiais, distribuídos, na grande maioria, em posições distintas, ocupando uma área de maior abrangência na cidade de João Pessoa. Nota-se ainda que adotando estratégias diferenciadas, os locais eleitos assumem posições diversas, incorporando as vantagens e características de cada método: experiência do gestor, similaridade das ocorrências dentro de cada cluster e a menor distância entre a demanda e a respectiva facilidade. A seleção de locais candidatos é um processo crucial, porque o conjunto de pontos eleitos vai refletir diretamente na qualidade da solução do modelo formulado para localização de viaturas operacionais.

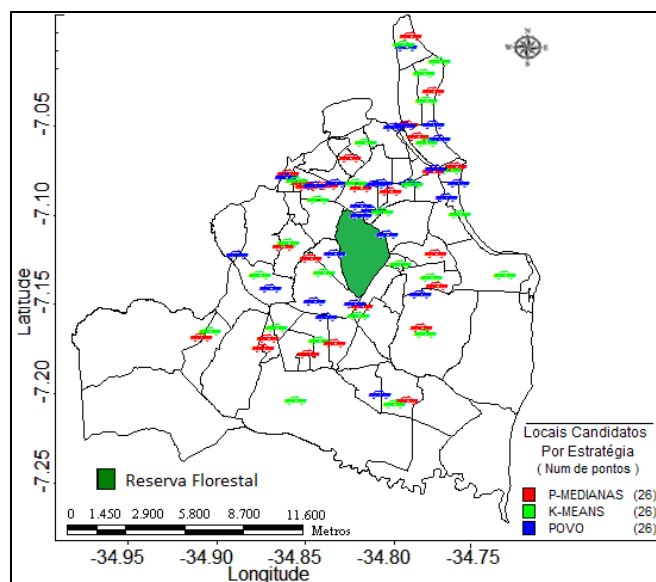


Figura 6 - Distribuição do conjunto de pontos candidatos selecionados

Observa-se ainda que na área do Centro, onde foi identificado *hotspots* crônico, foram eleitos 8 pontos para posicionamento de viaturas (Figura 7), caracterizando a eficiência do emprego de mais de uma estratégia, para seleção de pontos candidatos. Porém, esta avaliação só foi possível com a identificação prévia da zona quente de criminalidade, naquele bairro. Caso contrário, não haveria parâmetros de comparação e avaliação da qualidade dos pontos eleitos, para situar viaturas com prioridade, em locais de maior concentração de crimes, visando inibir e reduzir a incidência naquela localidade.

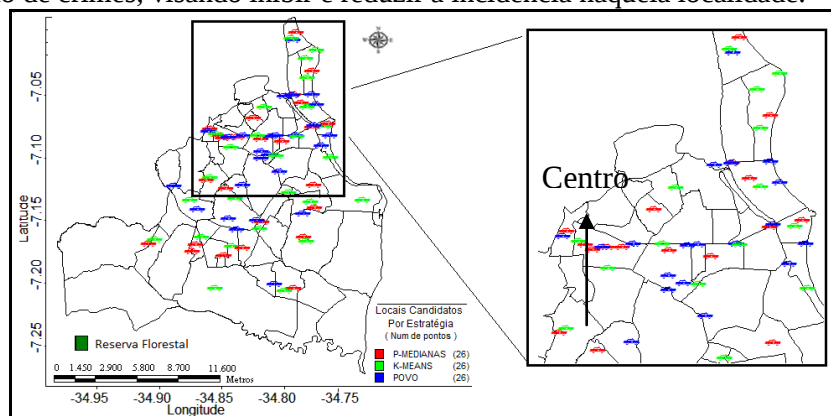


Figura 7 - Distribuição de pontos candidatos, enfatizando o Centro

5. Conclusão

O conjunto de locais candidatos tem grande influência sobre a solução final apresentada por um modelo de localização de facilidades. Sendo assim, o uso de estratégias variadas para eleger tais locais é muito importante, porque os pontos tenderão apresentar características diferenciadas e ocupar maior abrangência espacial. Nesta pesquisa, 78 pontos candidatos foram selecionados, através de três estratégias distintas: decisão do gestor, modelo de p-medianas e método de clusterização *k-means*. Além da determinação do conjunto de locais candidatos ao posicionamento de viaturas policiais, é preciso avaliar a eficiência e eficácia dos pontos sugeridos, verificando se cobrirão também as áreas com *hotspots* de crimes, identificados previamente. O uso de SIG foi fundamental no georreferenciamento das ocorrências, na visualização da distribuição dos pontos candidatos, assim como na identificação de *hotspots* de crimes e resolução do problema de p-medianas.

Na Polícia Militar, atualmente, não existem pontos definidos para situar viaturas no policiamento ordinário, (excluindo o POVO), de modo que as unidades móveis quando lançadas, podem assumir, conforme decisão do comandante da guarnição ou do CIOP, quaisquer locais do setor (área geográfica composta por um ou mais bairros). Neste sentido, esta pesquisa poderá auxiliar gestores de segurança pública, a oferecer um serviço com eficiência e eficácia, através de sugestão de posicionamento otimizado de viaturas, para prevenção e redução da criminalidade, em bairros da capital paraibana.

Por fim, o conjunto de locais candidatos, registrado nesta pesquisa, será utilizado no modelo matemático probabilístico que será formulado com objetivo de localizar viaturas policiais para atender o máximo de pessoas, em um intervalo de tempo aceitável.

Referências

- Bailey, T. C. Gatrell, A. C.** (1995), *Interactive Spatial Data Analysis*. Essex, Longman scientific & technical.
- Bandyopadhyay, M. Pratap, M.** (2012), Singh Spatial Pattern Analysis for finding Weighted Candidate Set for p-median Problem in Locating Emergency Facilities. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. Volume 2.
- Beato, C. Assunção, R. Andrade, M V e outros.,** *Compreendendo e Avaliando: Projetos de Segurança Pública*. Editora UFMG. Belo Horizonte. MG. 2008.
- Braga A.A.**(2005), Hot spots policing and crime prevention: A systematic review of randomized controlled trials. *Journal of Experimental Criminology* 1:317–342.
- Câmara, G., Carvalho, Marília S.** (2004), *Análise Espacial de Evento*. In: Druck, S. Carvalho, M.S. Câmara, G. Monteiro, A.V.M., Eds, *Análise Espacial de Dados Geográficos*. EMBRAPA,. Brasília. ISBN: 85-7383-260-6.
- Câmara, G. Casanova, M. A.,** *Bancos de Dados Geográficos*. Curitiba. MundoGEO. 2005.
- Chainey, S. Tompson, L. Uhlig, S.** (2008), The utility of Hotspot Mapping for Predicting Spatial Patterns of Crime. *Security Journal*, 21:4–28.
- Costa, C. M. P.** (2010), *Localização Óptima do Futuro Hospital de Sintra : Aplicação de Modelos de Location-Allocation no Planeamento de Cuidados de Saúde*. Instituto Superior de Estatística e Sistema de Informação. Universidade Nova de Lisboa. Portugal.
- Curtin, K. Hayslett-McCall, K. L. Qiu, F.** (2010), Determining Optimal Police Patrol Areas with Maximal Covering and Backup Covering Location Models, *Networks and Spatial Economics*, v.10, n.1, 125-143.
- Gorr, W L. Lee, Y J.**(2012), Longitudinal Study of Crime Hot Spots: Dynamics and Impact on Part 1 Violent Crime. *Presented at the: 32nd International Symposium on Forecasting*, Boston, USA.
- Hair, J. F. Rolph, A. E. Tatham, R. L. Black, W. C.** *Análise Multivariada de Dados*, 5 ed, Bookman, Porto Alegre, Brasil, 2005.
- Hakimi, S. L.**(1964), Optimal locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph, *Operation Research.*, n. 12, p 450-459.
- Kaveh, P. Zadeh, S. A. Sahraeian, R.** (2010), Solving Capacitated P-median Problem by Hybrid K-means Clustering and FNS Algorithm. *International Journal of Innovation, Management and Technology. Proceedings of the 2010 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Dhaka, Bangladesh, v. 1, n. 4.
- Lorena, L. A. N., Senne, E. L. Paiva, J. A.**(2001), Integração de modelos de localização a sistemas de informações geográficas. *Integration of location models to geographical information systems*, *Gestão & Produção*, São Carlos, v.8, n.2.
- Lorena, L. A.N.** (2003), *Análise Espacial de Redes com Aplicações em Sistemas de informações Geográficas*, INPE, São José dos Campos, (www.lac.inpe.br/~lorena/producao/Analiseredes.pdf, 4, 2013).

- MacQueen, J. B.** (1967), Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations, *In: Cam, L.M. L. Neyman, J., editors, Proceedings of the fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, University of California, USA, v.1, p. 281–297.
- Mahajan, M. Nimbhorkar, P. Varadarajan, k.** (2009), *The Planar k-Means Problem is NP-Hard*. In: Das, S. Uehara, R., editors, WALCOM: Algorithms and Computation, Lecture Notes in Computer Science, Kolkata, India, volume 5431, p. 274–285.
- Mapa, S. Lima, R. Mendes, J.** (2006) Localização de instalações com o auxílio de Sistema de Informações Geográficas (SIG) e Modelagem Matemática, *XXVI ENEGEP*. Fortaleza. Brasil.
- Mitchell, P.** (1972), Optimal selection of police patrol beats, *J Crim Law Criminol Police Sci* 63:577–584.
- Oliveira, M G.** (2012), Sistema de Localização de Facilidades: Uma abordagem para mensuração de pontos de demanda e localização de facilidades, *Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Informática da Universidade Federal de Goiás.*, Goiânia, GO, Brasil.
- Pizzolato, N. D. Raupp, F. M. P. Alzamora, G. S.** (2012), Revisão de desafios aplicados em localização com base em modelos da p-mediana e suas variantes, *SOBRAPO*, Rio de Janeiro, Brasil. v.4, n.1, p. 13-42.
- ReVelle, C. S. Eiselt, H.A.** (2005), Location analysis: A synthesis and survey. *European Journal of Operational Research*, 165. 1–19.
- SPRING** - Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas, INPE, São José dos Campos, SP, <http://www.dpi.inpe.br/spring>, 1998.
- Weisburd, D. L. Bushway, S. Lum, C. Yang, S.** (2004), Trajectories of crime at places: a longitudinal study of street segments in the city of Seattle, *Criminology* ,42:283–321.
- Weisburd, D. L. Groff, E. R. Morris, N.** (2011), *Hotspots of juvenile crime: Findings from Seattle*. National Institute of Justice, Washington, District of Columbia. USA.