

APLICAÇÃO DA TEORIA DE GRAFOS E ANÁLISE ESPACIAL PARA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS GEOGRÁFICOS: UM ESTUDO DA CRIMINALIDADE VIOLENTA NO HIPERCENTRO DE BELO HORIZONTE

Antônio Hot Pereira de Faria

Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial da PUC Minas.

Bolsista CAPES. hot.pmmg@gmail.com

Diego Filipe Cordeiro Alves

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial da PUC Minas.

Bolsista CAPES. diegofcalves@gmail.com

Dr. Leônidas Conceição Barroso

Professor do Programa de Pós-Graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial da PUC Minas.

lbarroso@pucminas.br

1 Introdução

A questão da criminalidade violenta no espaço urbano tem perpassado por duas agendas, uma referente à segurança pública e suas implicações em relação à desagregação e desordem social, e as discussões dos espaços urbanos e seus aspectos de exclusão e marginalidade, outra referente ao planejamento urbano e os desafios para superar esse fenômeno, cada vez mais presente como sendo “típico” do ambiente da cidade.

Os indicadores de criminalidade e violência nos centros urbanos apontam para um crescimento generalizado, porém com ilhas de concentração dos crimes violentos em determinados locais. No Brasil, segundo Beato *et al.* (2008), a partir de dados do Censo de 2000, do Sistema Único de Saúde e do Centro de Estudos de Criminalidade e Segurança Pública, as regiões metropolitanas de Rio de Janeiro e São Paulo concentram 40% dos homicídios cometidos no país, embora tenham 18% da população, e, em outra escala também alarmante do ponto de vista da concentração do fenômeno, cerca de 20% das mortes violentas acontecem em menos de 2% da área geográfica dos centros urbanos.

Em Belo Horizonte, conforme dados que agrupam crimes violentos (homicídio, homicídio tentado, roubo, roubo a mão armada, estupro, latrocínio, extorsão mediante sequestro e sequestro e cárcere privado) verificou-se que a região do hipercentro da cidade concentra a maior densidade de crimes por área de todo o espaço urbano.

Para a análise do crime, os geógrafos aplicam técnicas de estatística espacial, que contribuem para a compreensão da estruturação e do rearranjo espacial da criminalidade (Diniz; Batella, 2006), muito úteis do ponto de vista acadêmico no entendimento do fenômeno, bem como para planejamento e implementação de políticas públicas para prevenção, controle e combate ao crime e à violência.

Dentre as possibilidades de suporte para resolução de problemas geográficos, tem-se a aplicação da teoria de grafos, quando se estuda principalmente contextos e realidades que podem ser modelados por meio de redes (Lima; Barroso; Abreu, 2012).

De outro lado, têm-se as instituições responsáveis pela segurança pública com o desafio de identificar os locais de interesse (onde há concentração de crimes) para bem alocar os recursos públicos (logísticos e humanos) destinados à prevenção, controle e combate ao fenômeno criminal.

Neste sentido, tem-se o objetivo central deste trabalho de propor, a partir da teoria de grafos e técnicas de análise espacial, uma metodologia de modelagem do fenômeno criminal no espaço urbano a fim de definir pontos de interesse espacial para definição de rotas seguras e otimização dos recursos públicos de prevenção criminal.

Trata-se de um estudo interdisciplinar que integra conhecimentos geográficos, matemáticos, computacionais e das ciências sociais e militares.

2 Considerações sobre a Teoria de Grafos

A teoria de Grafos foi utilizada para a modelagem do problema geográfico da distribuição espacial de crimes, obtida por meio de técnica de análise espacial.

Segundo Barroso (1998, p. 13) um Grafo “é uma estrutura matemática constituída de dois conjuntos, sendo um V , finito e não vazio, de n vértices, e outro E , de m arestas, que são pares não ordenados de elementos de V ”. Para as estruturas em que a direção das arestas é relevante, tem-se um “digrafo”.

Os vértices do grafo são adjacentes se definem uma aresta, ou seja, se (a, b) é uma aresta do grafo, então (a, b) incide em “ a ” e em “ b ”. Um caminho é uma sequência de arestas distintas adjacentes. O caminho, por sua vez, poderá ser aberto, quando vai de v_l a w_p , em que

$v_l \neq w_p$, ou aberta quando $v_l = w_p$. Há um ciclo quando se tem um caminho fechado (neste caso, o grafo é cíclico, quando não há ciclos, o grafo é acíclico). Quando existe um caminho que liga os vértices v e w , diz-se que v alcança w . O grau do vértice do grafo é o número de incidências de arestas no vértice. Um laço ocorre quando uma aresta possui vértices coincidentes. Diz-se que arestas são paralelas quando compartilham o mesmo par de vértices extremos. Se um grafo não possui laço nem arestas paralelas, ele denomina-se simples. O grafo poderá também ser classificado como conexo, quando a partir de um vértice qualquer se alcança todos os demais vértices do grafo, ou como desconexo. Quando não há arestas partindo de um vértice, este é chamado de vértice isolado. O grafo será valorado quando suas arestas e/ou vértices estão relacionados a algum atributo (estes grafos são utilizados na modelagem de problemas que buscam minimizar distâncias – em termo espacial, temporal, de custos, etc.). Os grafos podem ser representados por diversas formas, dentre as quais se destacam a por meio de matrizes (adequados para a manipulação matemática) e a geométrica, que facilita a compreensão (principalmente de informações espaciais) (Barroso, 1998).

Uma das possibilidades de resolução do problema geográfico proposto neste trabalho é a do **caminho mínimo**. A determinação do caminho mínimo entre dois vértices de um grafo tem como objetivo minimizar a distância entre eles, sendo que a distância poderá ser (espaço, tempo, custo, etc.). Um dos mais famosos algoritmos utilizados na resolução deste problema é o de Dijkstra (1959) que permite a resolução para arestas com pesos positivos (Lima; Barroso; Abreu, 2012).

Outro problema proposto refere-se à **localização**, em que se busca identificar locais propícios para instalação de uma determinada facilidade (equipamento ou serviço público, fornecimento de bens, etc.). A excentricidade de um vértice v é o valor da distância máxima entre o vértice v e os demais vértices do grafo, ou seja, $exc(v) = \max_{v,w} \{d(v,w)\}$.

Já o raio de um grafo é o valor mínimo dentre as excentricidades de seus vértices, ou seja, $raio(G) = \min_{v \in V} \{exc(v)\}$. Sendo v e w dois vértices quaisquer de um grafo, então a igualdade $d(v,w) = d(w,v)$ se verifica, o qual não ocorre se tratar-se de um digrafo. O centro de um grafo é um vértice cuja excentricidade é igual ao raio, já a mediana ou centroide refere-se ao caso em que o vértice v deve apresentar $\sum_{w \in V} d(v,w)$ mínima, dentre todos os vértices de um grafo. As definições de centros e medianas de grafos restringem-se a análise de grafos conexos, já que o parâmetro para definição é a distância e, no caso de grafos desconexos, tem-se vértices com distância infinita.

Outra definição importante para o trabalho é a de **conjunto dominante**, que segundo Boaventura Netto e Jurkiewicz (2009, p. 84) é “um subconjunto de vértices, tal que todo vértice do grafo está no conjunto ou é adjacente a um de seus vértices”. Tal definição permite que se encontrem os melhores locais para instalação de facilidades e relaciona-se com problemas de localização espacial. O conjunto dominante X de um grafo é aquele em que para todo $v \in V$, então $v \in X$ ou $v \in A(X)$, sendo $A(X)$ o conjunto de vértices adjacentes a cada um dos elementos de X para o grafo $G(V, E)$ (Barroso, 2001).

Por fim, destaca-se a **busca em profundidade** que consiste em uma técnica aplicada na exploração sistemática de um grafo. Por meio de caminho para visita em vértices e arestas do grafo é possível obter informações, tais como se o grafo é conexo, encontrar caminho entre dois vértices, além de identificar estruturas estratégicas como ponte e articulação (vértice que se removido deixa o grafo desconexo) ou ponte (aresta que se removida deixa o grafo desconexo) (Lima; Barroso; Abreu, 2012). Segundo Szwarcfiter (1984) uma busca é dita em profundidade quando o critério de escolha de vértice marcado (a partir do qual é feita a próxima exploração de aresta) obedecer a dentre todos os vértices e incidentes a alguma aresta ainda não explorada, escolher aquele mais recentemente alcançado na busca (Szwarcfiter, 1984, p. 88). No processo de busca, dois tipos de aresta podem ocorrer: de árvores (aquelas visitadas quando um dos extremos é comandante da busca v , e outro vértice w , acabou de ser alcançado. Nesse caso, v é o pai de w) e arestas de retorno (fazem conexão do comandante da busca v com um vértice w , anteriormente alcançado) (Barroso, 2007).

3 Polícia e policiamento ostensivo de prevenção criminal no contexto da Segurança Pública

A atividade de prevenção criminal é realizada por meio do policiamento ostensivo de preservação da ordem pública, cuja previsão constitucional reserva às Polícias Militares tal incumbência (BRASIL, 1988).

A Carta Magna cita o termo o termo “polícia ostensiva” em vez de “policiamento ostensivo”, o que amplia o conceito, elevando-o além do procedimento. Em outra instância, o policiamento refere-se a uma fase da atividade de polícia, do procedimento de “fiscalização”. O adjetivo “ostensivo” refere-se à ação de presença, característica do policial fardado, que por

intermédio da estrutura e estética militar, com uso de uniformes, equipamentos e distintivos próprios, representa e evoca a força da corporação policial (Minas Gerais, 2010).

As Polícias Militares são instituições subordinadas aos governos estaduais, organizadas em estrutura militar. A Polícia Militar de Minas Gerais está articulada em três níveis. O **nível de direção geral**, ou estratégico, é composto pelo Comando-Geral, Estado-Maior e Assessorias. O **nível de direção intermediária (UDI), ou tático**, é composto, na área da atividade-fim, pelas Regiões de Polícia Militar (RPM) e pelo Comando de Policiamento Especializado (CPE). O **nível de execução ou operacional**, composto na área da atividade-fim, pelas Unidades de Execução Operacional (UEOp) que podem ser Batalhões (BPM), Regimento de Cavalaria, Companhias Independentes (Cia PM Ind), Companhia de Missões Especiais (Cia MEsp). Os Batalhões/Regimento são articuladas em Companhias/ esquadrões (especiais ou orgânicas), Grupamentos, Pelotões, Grupos e Subgrupos, e cumprem missões específicas, definidas nos respectivos Planos de Emprego Operacional.

A estruturação das unidades da PMMG por área geográfica, em atenção ao princípio da responsabilidade territorial, ocorre nos níveis tático e operacional, exceção feita ao Comando de Policiamento Especializado¹ e suas unidades subordinadas, as quais não representam interesse imediato para o trabalho em tela.

A articulação operacional da PMMG atende ao princípio do modelo territorial, que consiste na divisão do Estado de Minas Gerais em espaços geográficos denominados regiões, áreas, subáreas, setores e subsetores, de responsabilidade de RPM, batalhões, companhias, pelotões e grupos PM, podendo estes desdobrar-se em subgrupos. Esse modelo tem como inspiradores uma maior proximidade aos cidadãos, a descentralização dos serviços policiais, e a modernização dos serviços relacionados com a atenção ao público. Articulado em respostas autossuficientes e multifuncionais, deverá permitir, utilizando critérios de descentralização, a adequação entre o serviço policial e as necessidades de segurança que surgem nos respectivos espaços geográficos (Minas Gerais, 2010).

Nos contornos do modelo territorial desenvolvem-se atividades de prevenção e repressão imediata em matéria de delinquência sobre um espaço territorial concreto, cuidando das respostas às demandas da comunidade, além de tarefas operacionais que excedem o âmbito das atividades ordinárias, tais como o policiamento de zonas quentes de criminalidade, de eventos, de locais de risco, dentre outros, cuidando das tarefas convencionais, no campo da dissuasão,

¹ O Comando de Policiamento Especializado (CPE) é responsável pelo recobrimento especial em todo Estado de Minas Gerais. É composto pelas seguintes unidades: Batalhão de Rondas Táticas Metropolitanas (Btl ROTAM); Batalhão de Polícia de Eventos (BPE); Regimento de Cavalaria Alferes Tiradentes (RCAT); Batalhão de Radiopatrulhamento Aéreo (Btl RpAer); Batalhão de Polícia de Guardas (BPGd); Batalhão de Polícia Militar Rodoviária (BPMRv); Grupamento de Ações Táticas Especiais (GATE); Companhia de Polícia Militar de Meio Ambiente (Cia PM MAmb) (MINAS GERAIS, 2010).

executando o policiamento ostensivo geral, mas em perfeita consonância e de forma complementar (Minas Gerais, 2010).

Destaca-se dentre as atividades policiais, o policiamento ostensivo geral ou ordinário:

O policiamento ostensivo ordinário (segurança preventiva) é a atividade de maior expressão na PMMG, pois proporciona um contato diuturno com as comunidades. É o responsável pela prevenção criminal e pela intervenção rápida, oportuna e de qualidade nos pequenos conflitos sociais, em razão da sua presença real e potencial em toda parte do território mineiro, percebida e visualizada de relance pelo uniforme, apetrechos e armamentos utilizados pelos policiais militares empregados nos diversos tipos e, principalmente, pelos processos de policiamento, sejam eles a pé, em bicicletas, em veículos motorizados de duas rodas (motocicletas) ou de quatro rodas (Minas Gerais, 2010, p. 61).

No modelo territorial, a prevenção criminal é realizada por meio do policiamento preventivo, com ações e medidas dedicadas a evitar ou a interromper a possibilidade ou a decisão de cometer um delito e impedir a realização de fatos ou atos que impliquem num delito, bem como a reprimir, de forma imediata, um ato delitivo em desenvolvimento, evitando a produção de consequências posteriores e garantindo, eventualmente, a responsabilização dos supostos delinquentes (Minas Gerais, 2010).

A PMMG se estrutura em unidades e subunidades de execução operacional, cada qual com nível correspondente a um espaço territorial de responsabilidade para desempenhar o esforço ordinário de policiamento ostensivo, de acordo com as características de cada território, conforme quadro abaixo:

Quadro 1: Articulação e reponsabilidade territorial - PMMG

Unidade/Fração	Responsabilidade Territorial	Nível
Região de Polícia Militar	Região	Engloba áreas (Batalhões)
Batalhão ou Companhia Independente	Área	Engloba Subáreas (Companhias)
Companhia ou Companhia Especial	Subárea	Engloba Setores (Pelotões)
Pelotão	Setor	Engloba Subsetores (Destacamentos)
Grupo (Destacamento)	Subsetor	-
Subgrupo (Subdestacamento)	Subsetor	-

Fonte: Minas Gerais (2010, p. 61).

4 Caracterização do Objeto de Estudo: criminalidade violenta em Belo Horizonte

Considerando o interesse deste estudo, de aplicação de técnicas de análise espacial e da teoria de grafos para solução de problemas geográficos afetos à criminalidade violenta, elegeu-se a região do hipercentro² de Belo Horizonte como objeto, uma vez que este espaço geográfico concentrou, de maneira sistêmica, no período de 2007 a 2013, a maior densidade de crimes violentos da cidade, com concentração anual superior a 1000 crimes por km², conforme expresso na figura abaixo.

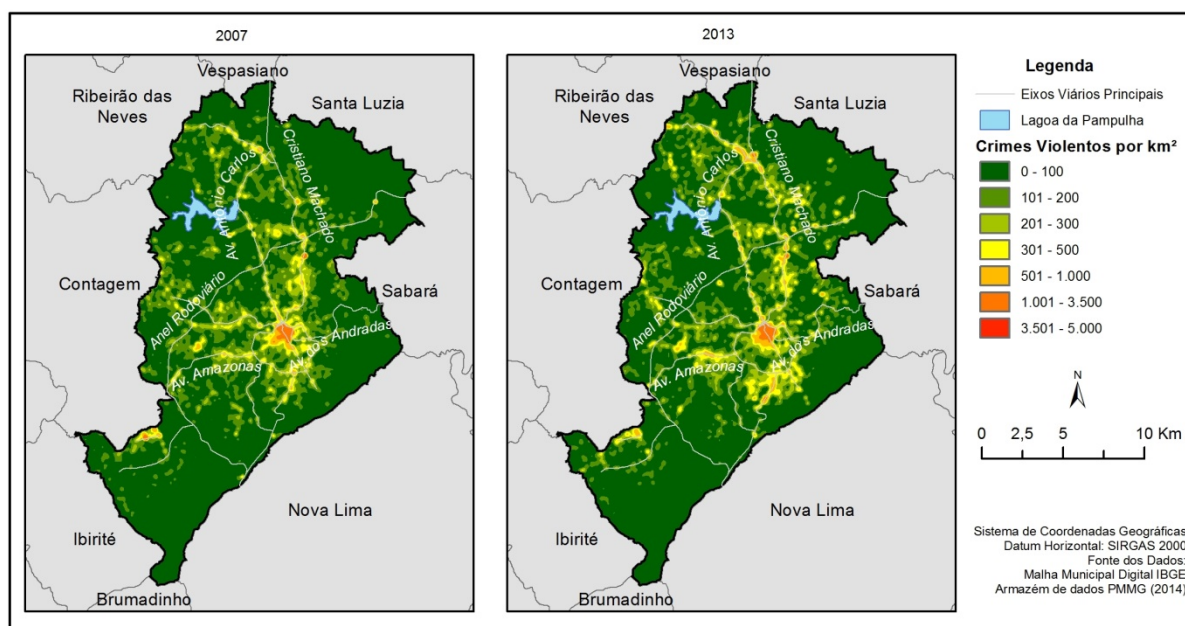


Figura 1: Evolução da distribuição espacial dos crimes violentos em Belo Horizonte nos anos de 2007 e 2013.
Fonte: Elaborado pelos autores.

A constatação ensejou o presente estudo, de escala espacial em nível local, a fim de se verificar com um nível de detalhamento maior a distribuição espacial do fenômeno e aplicar a teoria de grafos para o ambiente, considerando principalmente sua estrutura viária, com traçado do tipo ortogonal-radial.

O hipercentro de Belo Horizonte é dividido em quarteirões que possuem geralmente 120 x 120 metros. Cada quarteirão possuiu 20 lotes em média, que medem cerca de 600 m². As ruas, com largura de 20 metros se cruzam em ângulos retos (sistema ortogonal) na direção

² De acordo com o artigo 11 da Lei nº 7.166, de 27 de agosto de 1996, que estabelece o parcelamento, ocupação e uso do solo urbano em Belo Horizonte, as zonas centrais desempenham papel de polarização regional, municipal ou metropolitana e se subdividem em “Zona Hipercentral”; “Zona Central de Belo Horizonte”; “Zona Central do Barreiro” e “Zona Central de Venda Nova” (CMBH, 1996).

norte-sul e leste-oeste. As avenidas, com 35 metros de largura, cortam as ruas em ângulos de 45° (sistema diagonal) e correm no sentido nordeste-sudoeste ou noroeste-sudoeste.

A referida estrutura urbana e de vias permite a modelagem do espaço urbano em uma rede de maneira clara e didática e, portanto, é possível aplicar a teoria de grafos para analisá-lo como exemplo prático.

Em termos de atividades de prevenção criminal, a subárea do hipercentro é atendida pela 6ª Cia PM Esp, pertencente ao 1º Batalhão de Polícia Militar (1º BPM) da 1ª Região de Polícia Militar (1ª RPM).

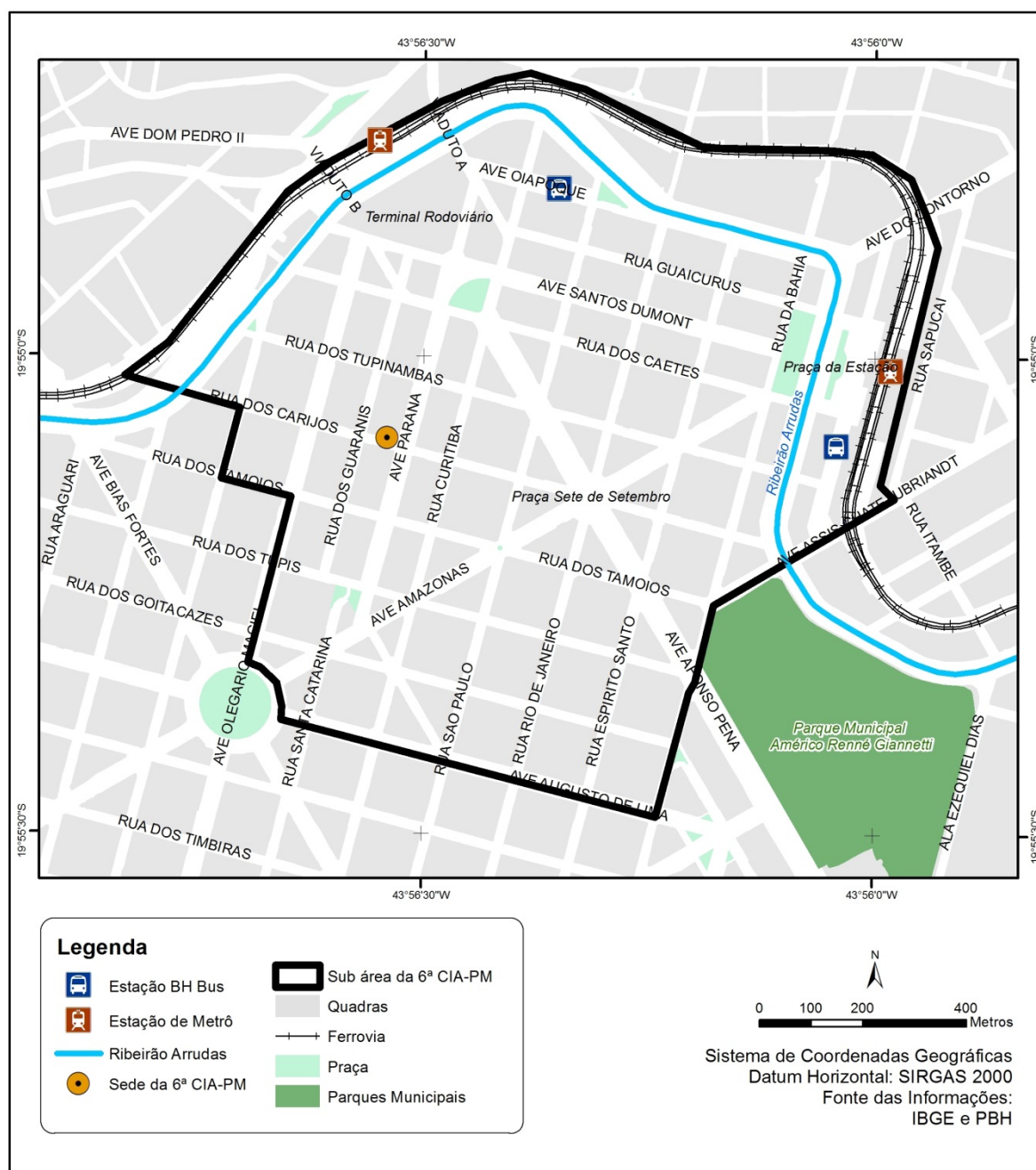


Figura 2: Mapa de localização do hipercentro de Belo Horizonte.

Fonte: Elaborado pelos autores.

5 Materiais e Métodos

O presente trabalho foi elaborado em duas etapas distintas, o mapeamento da concentração de crimes violentos no ano de 2013 na área de abrangência da 6ª Companhia de Polícia Militar Especial e a modelagem dos caminhos mais adequados a cada tipo de usuário nessa mesma região.

Primeiramente foi mapeada a densidade de ocorrências relacionadas a crimes violentos no hipercentro de Belo Horizonte.

Os dados de criminalidade para a cidade de Belo Horizonte com recorte temporal de 2013, obtidos do Armazém de dados de Registros de Evento de Defesa Social (REDS). Compõem os crimes violentos as ocorrências classificadas como homicídio, homicídio tentado, roubo, roubo a mão armada, estupro, latrocínio, extorsão mediante sequestro e sequestro e cárcere privado.

Os dados das ocorrências, obtidos em formato tabular, foram especializados de forma pontual a partir do par de coordenadas geográficas contidas no banco de dados. Desta forma, para cada uma das ocorrências foi gerado um ponto, posteriormente sobreposto à base de quadras e arruamento de Belo Horizonte.

O cálculo da concentração de ocorrências foi feito utilizando o estimador de densidades de *Kernel* implementado em ambiente *ArcGis* versão 10.0, utilizando como raio de busca 250 metros. Esta técnica permitiu a identificação de *hot spots* e de áreas com menor incidência de criminalidade. Os dados foram divididos em 10 classes, com os seguintes valores de quebra: 500, 750, 1.000, 1.250, 1.500, 1.750, 2.000, 2.500, 3.000 e 3.500 ocorrências por km².

O mapa a seguir apresenta a concentração de crimes violentos na área do hipercentro de Belo Horizonte, destacando-se as áreas do entorno do terminal rodoviário, a Praça Sete de Setembro (no entroncamento das Avenidas Afonso Pena e Amazonas) e o entorno da Praça da Estação como pontos de maior ocorrência destas modalidades de crime no ano de 2013.

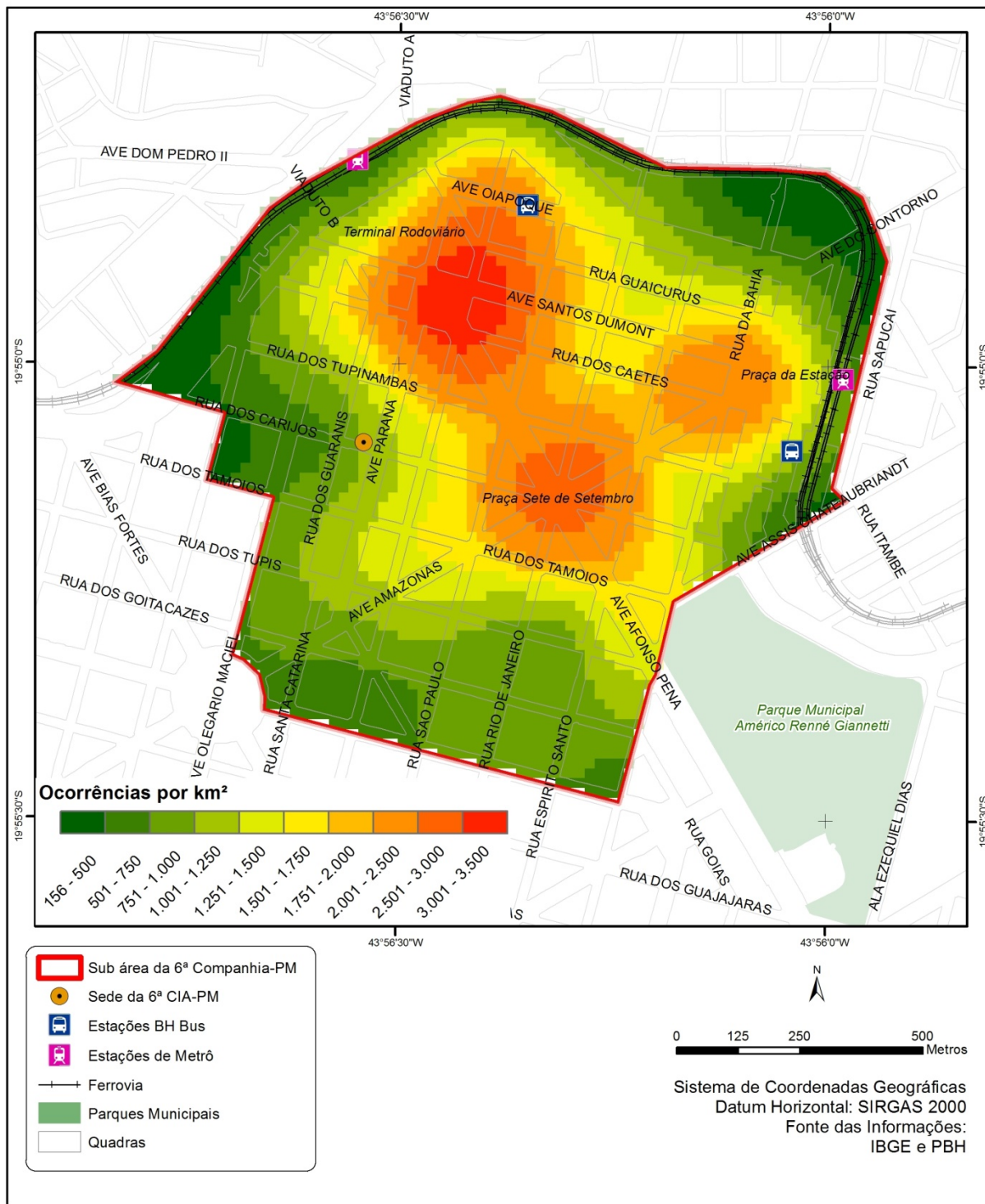


Figura 3: Densidade crimes violentos no hipercentro de Belo Horizonte (ano 2013).

Fonte: Elaborado pelos autores.

A segunda etapa do trabalho exigiu a modelagem dos caminhos possíveis dentro do hipercentro a partir do grafo. A geometria de grafo permite a resolução de problemas complexos que envolvam distâncias não euclidianas, tais como a busca de rotas mais curtas, rápidas ou otimizadas para instalação de facilidades, a partir de critérios pré-definidos. Para a

modelagem deste grafo, inicialmente foram criados as arestas em cada um dos logradouros da região em estudo.

O modelo foi implementado por meio do pacote de ferramentas *Network Analyst*, contido no *software* ArcGis versão 10.0.

As arestas foram criadas para cada um dos quarteirões na área de abrangência. Os vértices foram criados a partir dos entroncamentos dos logradouros, conforme demonstrado na figura a seguir.

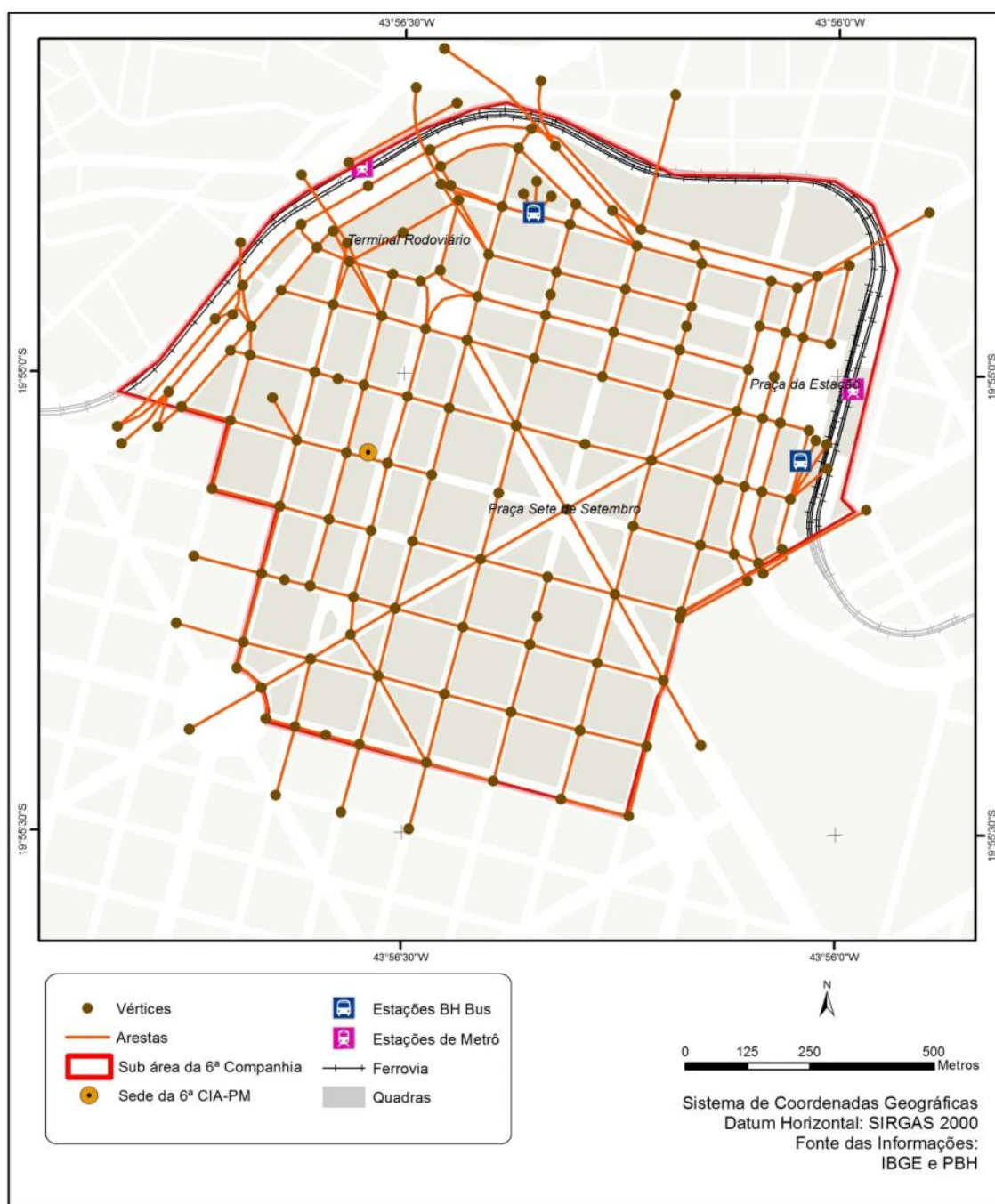


Figura 4: Mapa contendo Grafo modelado a partir da rede viária do hipercentro de Belo Horizonte.
Fonte: Elaborado pelos autores.

O cartograma acima mostra o grafo modelado a partir dos logradouros (arestas) e entroncamentos (vértices). Durante este processo foram excluídas as áreas de quarteirões fechados e, portanto, inacessíveis. Para o presente estudo foi atribuído como custo de cada aresta do grafo o grau de incidência de criminalidade da área por ela percorrida.

As 10 classes do mapa de concentração de crimes foram agrupadas em cinco classes para a atribuição de custos (impedância) durante a modelagem do grafo.

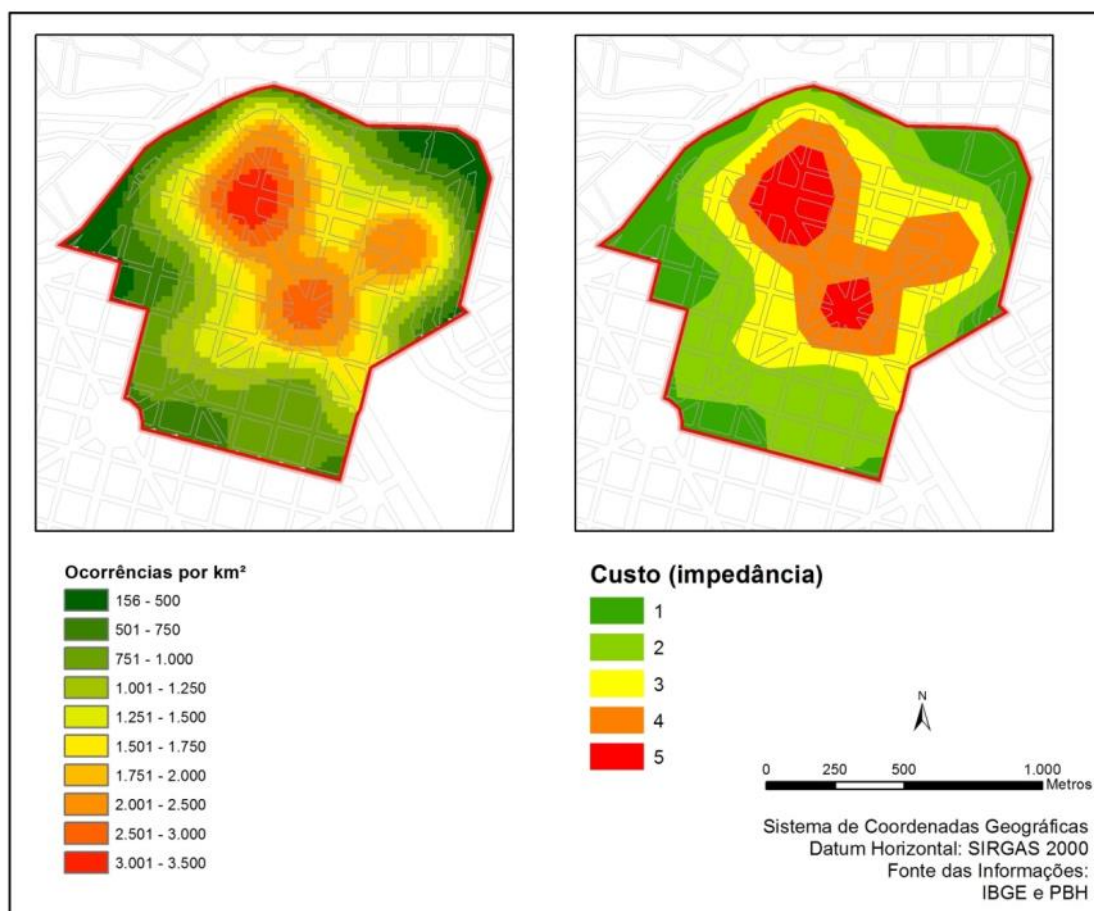


Figura 5: Representação da atribuição de custos a partir da densidade de crimes no hipercentro de Belo Horizonte.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os custos de percorrimento do grafo foram atribuídos, em um primeiro momento, de forma a priorizar o deslocamento por áreas de menor incidência de crimes. A busca pelo caminho de menor custo refere-se a uma busca em profundidade e caminho mínimo, e pode referir-se ou não ao caminho mais curto (menor distância espacial). Neste trabalho referir-se-á não apenas a menor distância espacial, mas também o menor custo, o que no caso proposto, indica as áreas mais seguras a serem priorizadas pelos usuários das vias (pedestres).

Em seguida, o custo foi invertido no intuito de se identificar as áreas prioritárias ao patrulhamento (áreas de maior incidência de crimes) ou de instalação de facilidades (equipamentos destinados à prevenção criminal, câmeras de segurança, postos de observação e vigilância, etc.) e refere-se à solução de problemas de localização, também possíveis por meio do estudo de grafos, conforme já exposto. Este artifício se fez necessário em função da própria arquitetura do *software*, que busca otimizar a rota entre os pontos selecionados a partir do “caminho mínimo”, ou da menor impedância (distância espacial, ou de menor custo conforme “pesos” atribuídos às arestas).

Quadro 2: Custo atribuído às arestas do Grafo conforme densidade de crimes

Classe Densidade de crimes (ocorrências por km ²)	Peso atribuído (usuário da via)	Peso atribuído (policimento)
156 a 500	1	5
500 a 750	1	5
750 a 1.000	2	4
1.000 a 1.250	2	4
1.250 a 1.500	3	3
1.500 a 1.750	3	3
1.750 a 2.000	4	2
2.000 a 2.500	4	2
2.500 a 3.000	5	1
3.000 a 3.500	5	1

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para cada uma das arestas foi atribuído o maior custo das áreas por ela percorrida. Ou seja, se uma aresta se estende por áreas com diferentes concentrações de ocorrências (diferentes pesos), o peso atribuído à aresta é o referente ao da área com maior densidade (maior custo), conforme exemplifica a figura a seguir.

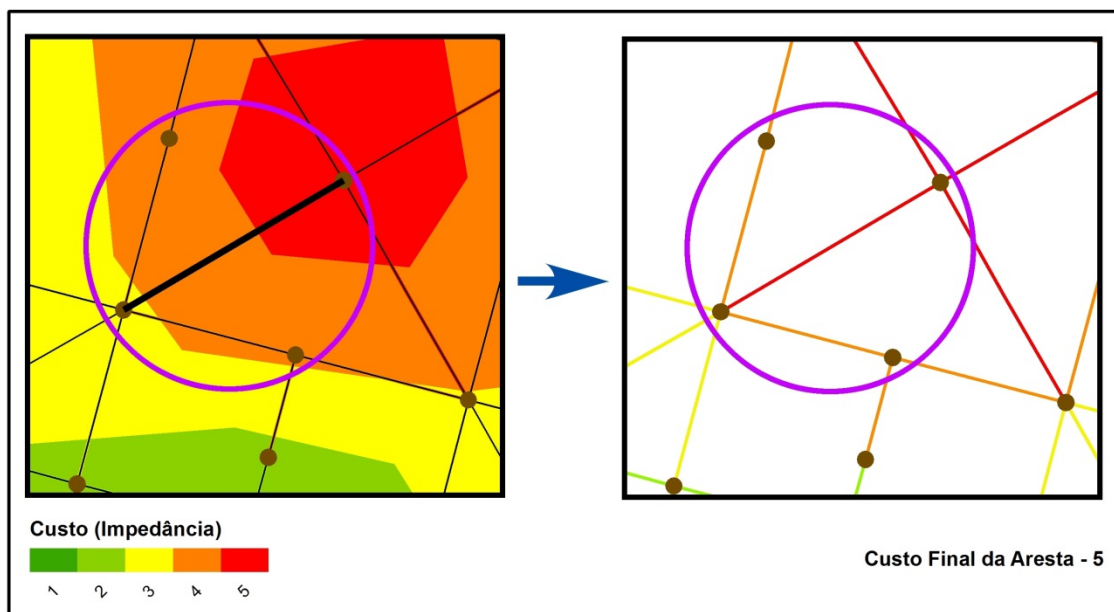


Figura 6: Exemplo da atribuição de custos às arestas, a partir da densidade de crimes no hipercentro de Belo Horizonte.

Fonte: Elaborado pelos autores.

No exemplo, observa-se que a aresta em destaque (ao lado esquerdo) “corta” três áreas de densidades criminais distintas, com custos iguais a 3 (área amarela), 4 (área laranja) e 5 (área vermelha). Conforme figura (à direita), a aresta do “grafo valorado” herdou o maior custo, ou seja, passou a ser uma aresta de custo 5.

Essa etapa permitiu a confecção de um “grafo valorado”, o qual permite a análise de caminhos mínimos, tanto de análise das rotas mais curtas quanto a de rotas otimizadas para instalação de facilidades – no caso, que contemplem caminhos mais seguros ou de prioridade de instalação de policiamento (menos seguros).

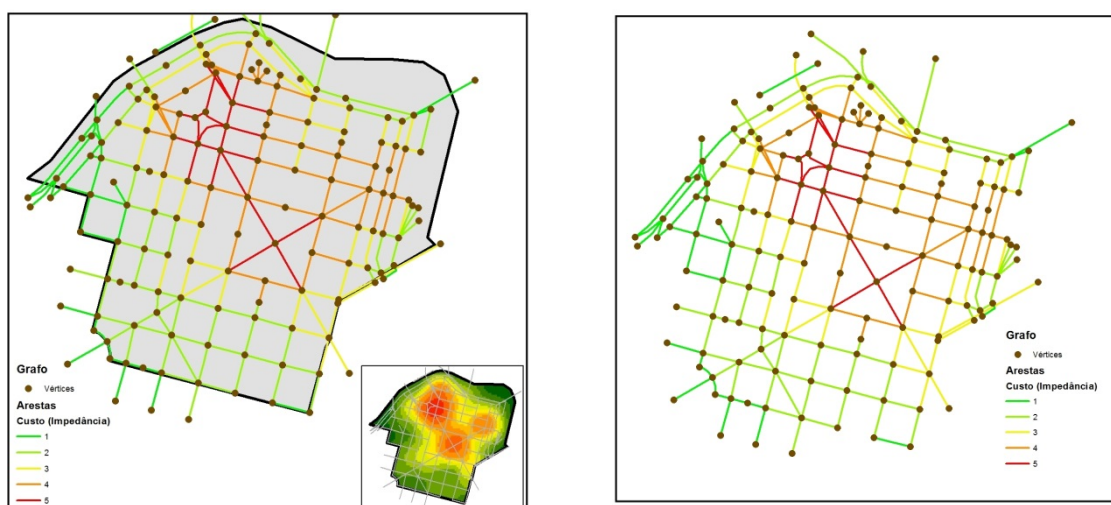


Figura 7: Representação da construção do “grafo valorado” a partir da densidade criminal.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A FIG. 7, conforme representação à direita, apresenta o grafo com os respectivos custos (impedâncias) de cada uma das arestas. As arestas em verde – custo 1, representam os espaços de menor impedância ou de menor incidência (ou probabilidade) de crimes e, portanto, mais indicadas aos usuários da via (pedestres). As arestas em vermelho representam os locais de maior impedância (maior custo) e representam onde ocorreram mais crimes no período analisado e, portanto, prioritárias à instalação de facilidades afetas à prevenção criminal (policciamento ostensivo geral).

A partir desses insumos foram propostas, a partir da análise de caminhos mínimos do conjunto de ferramentas de *Network Analyst* do Software *ArcGis* versão 10.0, que opera o algoritmo de Dijkstra, três rotas diferentes que passassem pelos mesmos pontos no hipercentro.

As três rotas levaram em consideração três situações distintas: o menor caminho (menor distância a ser percorrida), o caminho mais seguro (menor custo relativo à incidência criminal, ou menor impedância) e o caminho menos seguro (de maior custo relativo à incidência criminal; ou de menor custo, considerando os valores complementares àqueles do caminho mais seguro).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente discute-se o grafo modelado a partir da rede viária do hipercentro de Belo Horizonte, conforme já apresentado na FIG. 7.

O Grafo apresenta as seguintes características: o grafo é **conexo**, pois a partir de um vértice qualquer se alcança todos os demais vértices do grafo, é **cíclico**, pois há um caminho fechado que passa por seus vértices, **valorado** quando suas arestas e/ou vértices estão relacionados a algum atributo, no caso as arestas foram valoradas pela incidência criminal.

O grafo modelado totalizou 253 arestas e 159 vértices. Após terem sido atribuídos os pesos das arestas, foram propostas duas abordagens:

a) um caminho entre dois pontos localizados nos extremos norte e sul do hipercentro (subárea da 6ª Cia PM Esp) compreendendo o caminho mínimo com critérios apenas de distância espacial e um caminho mínimo incluindo também o custo relativo aos crimes;

b) uma aplicação da teoria para otimizar uma rota para o policiamento com partida e retorno da sede da 6ª Cia PM Esp e que visitasse os pontos de maior incidência de

criminalidade, sempre percorrendo as arestas de maior custo (áreas prioritárias ao policiamento).

A primeira das propostas buscou deixar a resolução do problema de roteamento o mais livre possível, diminuindo a influência dos autores sobre a escolha do caminho (com maior grau de liberdade possível), tendo sido definido apenas o ponto de partida e de chegada. Desta forma, foi possível verificar como o algoritmo de Dijkstra soluciona a otimização de rotas em um mesmo local a partir de três diferentes critérios. Os caminhos constam na figura a seguir:

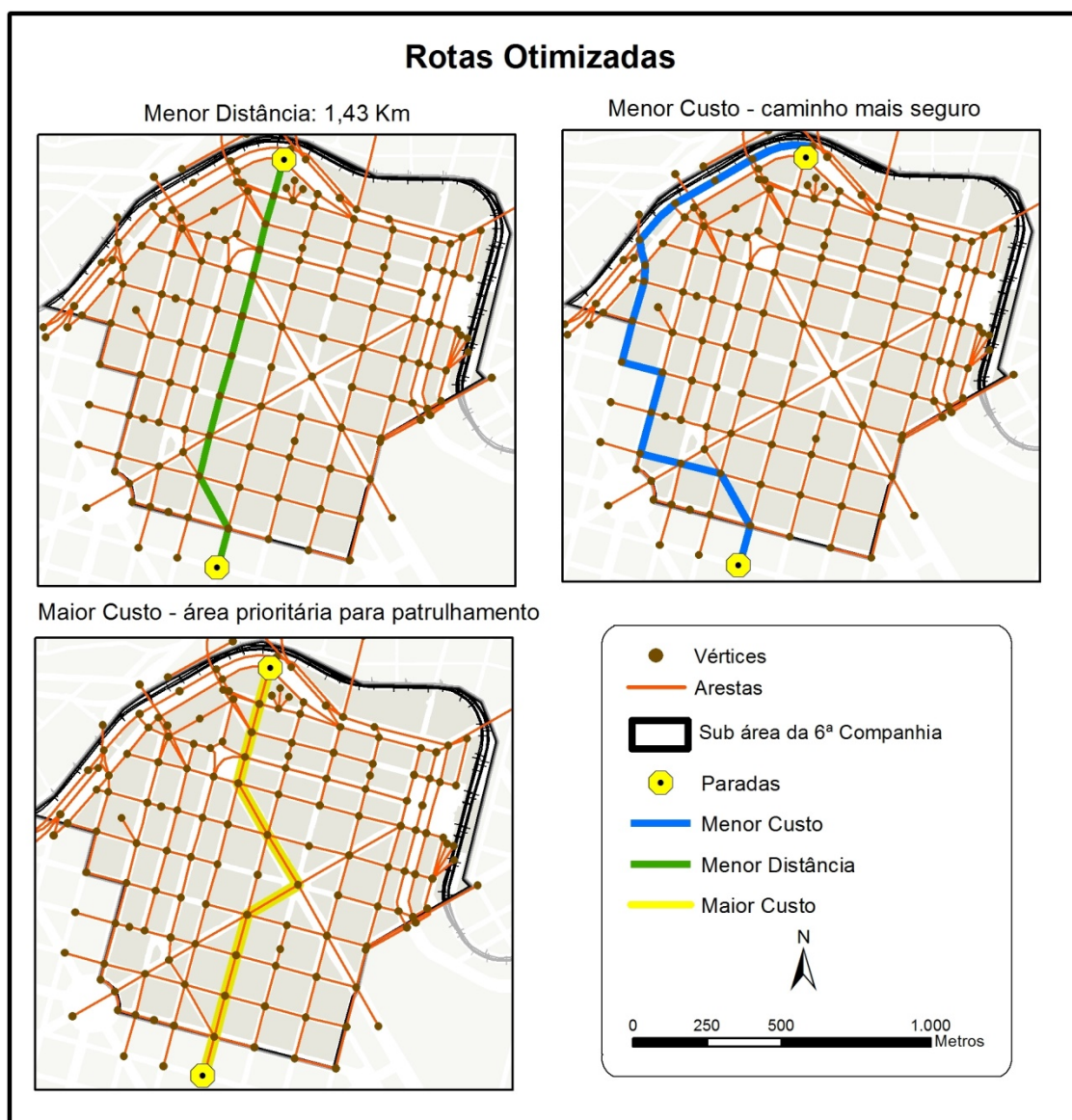


Figura 8: Representação da construção dos três tipos de percursos propostos pelo modelo.
Fonte: Elaborado pelos autores.

A FIG. 8 traz a comparação das três rotas proposta pelo algoritmo de Dijkstra. A primeira rota, assinalada em verde, representa o caminho mais curto para o atravessamento do

hipercentro no sentido norte-sul. Para este caminho a impedância foi considerada o próprio comprimento de cada uma das arestas. Desta forma, a geometria do grafo foi utilizada como critério de decisão na definição de percurso.

A segunda rota, assinalada em azul, mostra o caminho de menor custo. Para esta rota a impedância foi considerada o grau de incidência de crimes por km² em cada uma das áreas percorridas pelas arestas. Desta forma, a rota em azul indica o caminho “mais seguro”, ou de menor propensão à ocorrência de crimes para o atravessamento da mesma região percorrida anteriormente. Observa-se que, desta vez, a distância percorrida não é mais um critério de decisão. O caminho evitou as áreas centrais do grafo, marcadas pela maior incidência de crimes e, para chegar ao mesmo destino das demais, demandou o uso de um maior número de arestas e, com isso, uma maior distância métrica percorrida.

A terceira, rota, em amarelo representa o caminho de maior custo. Para esta rota foi utilizada a impedância complementar do caminho de menor custo (conforme QUADRO 2), de forma que às áreas de maior incidência de criminalidade foi atribuído um menor peso. O algoritmo buscou calcular uma rota que acumulasse o menor custo atribuído às arestas, o que significa, neste caso, uma maior incidência de criminalidade. Esta rota em muito se assemelha à rota de menor distância. Ressalta-se, entretanto, o desvio que a mesma faz em direção à área central do grafo, onde predominam altas concentrações de ocorrências criminais.

Por fim foi proposta a solução do problema geográfico de otimizar o caminho de patrulhamento, que permitisse a instalação de policiamento preventivo nos locais de maior necessidade, ou seja, que possuísse maior incidência de crimes, de maneira a atender o modelo territorial de execução da polícia ostensiva de prevenção criminal. Essa aplicação da teoria de grafos refere-se a localização de facilidades, no caso, afetas à segurança pública.

Para efeito de apresentação, o grafo contendo o caminho de policiamento (maior custo criminal), foi sobreposto ao mapa de densidade de crimes, de forma a demonstrar que a modelagem proposta corrobora com os dados pontuais e com a densidade de eventos.

A FIG. 9, apresenta a rota otimizada para o patrulhamento. As premissas para a elaboração do mesmo foram:

a) a localização geográfica da sede do 6^a Cia PM Esp, a qual possui responsabilidade territorial do local, como sendo o ponto de partida e de retorno para o “patrulhamento policial”, seja ele realizado em qualquer modalidade (a pé, em viatura, etc.);

b) obrigatoriedade de visitação aos pontos centrais de concentração da densidade de crimes violentos, de forma a passar pelas arestas com o maior curso (ruas com maior incidência de crimes violentos);

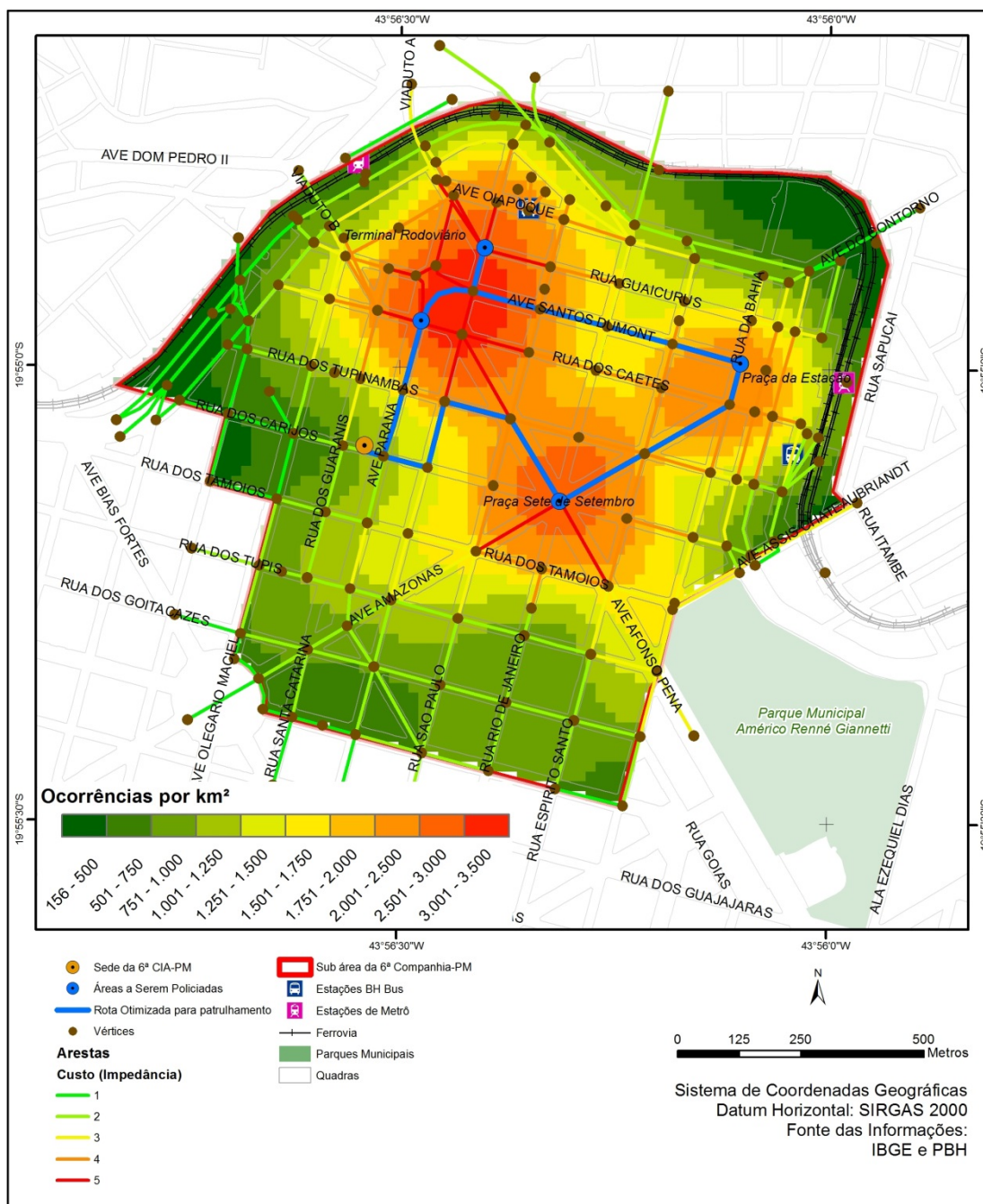


Figura 9: Representação da rota otimizada para o patrulhamento.
Fonte: Elaborado pelos autores.

O caminho do policiamento proposto pela utilização dos grafos em aplicação do algoritmo de Dijkstra apresentou uma possibilidade de obter-se o máximo de eficiência dos

recursos empregados na segurança pública, o que permite cobrir áreas com maior necessidade com o mínimo de esforço.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido é uma exploração da Análise Espacial e da Teoria de Grafos na solução de problemas geográficos. Foram abordados aspectos teóricos acerca da teoria dos grafos e aplicáveis para a solução proposta e realizada a contextualização sobre emprego no planejamento correlato à segurança pública, em especial da prevenção criminal.

Um dos objetivos principais do trabalho foi da apresentação da metodologia empregada, com a construção conceitual e aplicação para modelagem do fenômeno criminal no ambiente urbano, no caso que concentrou a maior incidência no ano de referência (2013), considerando que, com base no caminho percorrido é possível desenvolver o trabalho com outros critérios (diferentes modalidades criminosas, outros locais, etc.).

Foram empregadas duas técnicas de análise espacial, sendo a de estatística espacial para estimação de densidade, a função de densidade de Kernel. A estimação de densidade de Kernel é uma técnica que procura fornecer uma estimativa suavizada da densidade de probabilidade por unidade de área.

De maneira geral, o uso do grafo se mostrou muito eficiente, tanto na resolução de problemas envolvendo rotas livres entre dois pontos quaisquer, quanto na elaboração de rotas otimizadas a partir de critérios pré-definidos por usuários.

O modelo, ainda incipiente, apresentou ser útil na medida em que permite sua sofisticação a partir da atualização de dados, modelagem de outros aspectos do grafo (tempo de percurso por cada via), informações de trânsito e outras.

Como fruto do trabalho observou-se que este se apresenta como um instrumento auxiliar ao desenvolvimento de programas de prevenção criminal e, de modo geral, os resultados oferecem subsídios para criação de mecanismos e implementação de políticas públicas de combate ao crime e à violência.

REFERÊNCIAS

Barroso, M. M. A. 2007. Operações elementares em grafos e aplicações. In: Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional, 7. *Anais*. Uberlândia.

Barroso, M. M. A. 2001. Conjunto dominante: uma ferramenta para tratamento de dados espaciais. In: *Aula Magna*, Belo Horizonte, ano 7, n. 6, pp. 68-75.

Barroso, M. M. A. 1998. A matemática na limpeza urbana: trajeto ótimo do caminhão de lixo. In: Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional. *Anais*. Caxambu.

Boaventura Netto, P.; Jurkiewicz, S. 2009. *Grafos: introdução e prática*. São Paulo; Blucher.

Brasil. 1988. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília: Senado Federal.

CMBH – Câmara Municipal de Belo Horizonte. 1996. *Lei nº 7.166, de 27 de agosto de 1996*. Belo Horizonte, CMBH.

Diniz, A. M. A.; Batella, W. B. 2006. Abordagens espaciais no estudo da criminalidade violenta nas cidades médias mineiras. In: Simpósio Internacional sobre Cidades Médias, Uberlândia. *Anais*, Uberlândia, p. 1-13.

Lima, M. C. P. B.; Barroso, L. C.; Abreu, J. F.. 2012. Explorando a Teoria de Grafos no Tratamento de Problemas Geográficos. In: *Sistemas, Cibernética e Informática*. v. 9, n. 2.

Minas Gerais. 2010. Polícia Militar de Minas Gerais. Diretriz para Produção de Serviços de Segurança Pública Nº 3.01.01/2010. *Diretriz Geral para Emprego Operacional da PMMG*. Belo Horizonte: Comando-Geral, 3ª Seção do Estado-Maior da PMMG.

Szwarcfiter, J. L. 1984. *Grafos e algoritmos computacionais*. Rio de Janeiro: Campus.