

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA

GERMAN GREGÓRIO MONTERROSA AYALA FILHO

USO DE PLATAFORMAS LIVRES DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO
GEOGRÁFICA APLICADOS EM ESTUDOS DE TRANSPORTES

Joinville

2016

GERMAN GREGÓRIO MONTERROSA AYALA FILHO

USO DE PLATAFORMAS LIVRES DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO
GEOGRÁFICA APLICADOS EM ESTUDOS DE TRANSPORTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Transportes e Logística, no Curso de Engenharia de Transportes e Logística da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville.

Orientadora: Profa. Dra. Simone Becker Lopes

Joinville

2016

USO DE PLATAFORMAS LIVRES DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO
GEOGRÁFICA APLICADOS EM ESTUDOS DE TRANSPORTES

GERMAN GREGÓRIO MONTERROSA AYALA FILHO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Transportes e Logística, no curso de Engenharia de Transportes e Logística na Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville.

Joinville (SC), 01 de Dezembro de 2016.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Simone Becker Lopes
Orientadora

Prof. Dr. Cassiano Augusto Isler
Membro

Prof. Dr. José Leomar Fernandes Júnior
Membro

Profa. Dra. Elisete Santos da Silva Zagheni
Membro

Agradeço primeiramente à minha família: minha mãe Arlene, meu pai German, minhas tias Amarilis e Ariane, e minha prima Freya que, forneceram amor e suporte fundamentais.

À professora Simone, que se tornou uma querida amiga e fonte de inspiração, pelo auxílio, incentivo e disponibilidade durante todo processo de elaboração deste trabalho.

À doce Ana Clara, pelo carinho, apoio incondicional, companheirismo e compreensão durante períodos de dificuldade.

Aos meus queridos amigos de Joinville, Curitiba e Florianópolis, que me lembram constantemente que os melhores momentos da vida são os em que nos afastamos das obrigações.

A todos os professores, técnicos e funcionários da UFSC que, sempre foram muito prestativos e atenciosos.

Às amizades construídas na UFSC, por tornarem minha passagem pela graduação mais agradável.

Ao professor Cassiano e ao amigo Alexandre, pelo auxílio na resolução do problema de alocação de viagens.

À professora Vanessa, pela atenção e por ajudar na estruturação textual deste estudo.

Aos colegas da AMUNESC, por alimentarem minha paixão por geoprocessamento.

Ao arquiteto Luiz Fernando e à Ana Paula, do IPPUJ, pela atenção e disponibilização de vários dados necessários.

Ao povo brasileiro, responsável pelo financiamento dos meus estudos.

Ao renunciar à liberdade,
o homem abre mão da própria qualidade que o define como humano
(Jean-Jacques Rousseau, O Contrato Social).

RESUMO

Os resultados do planejamento de transportes dependem da escolha e do uso das ferramentas mais adequadas ao seu desenvolvimento, portanto, é primordial conhecer as características, funções e desempenho do instrumento que se pretende empregar na solução de problemas. Pesquisadores e planejadores costumam apoiar suas decisões em tecnologia SIG (Sistemas de Informação Geográfica) e, para o caso do planejamento de transportes, é utilizado um segmento particular dos SIG, os SIG-T (Sistemas de Informação Geográfica aplicados ao Transporte). Os SIG-T comumente utilizados são softwares comerciais, por conta disso, este estudo objetiva verificar a possibilidade de utilização de SIG *open source* em análises peculiares ao transporte. A verificação foi feita por meio da aplicação de técnicas e rotinas específicas ao planejamento de transporte em ambiente SIG *open source*, sendo que os softwares utilizados foram o QGIS, GRASS GIS e GeoDa. Os resultados encontrados apontam que as três ferramentas puderam ser aplicadas em diversas categorias de análise em transporte, entretanto, elas não se enquadram inteiramente na categoria de SIG-T. Os SIG estudados não conseguiram aplicar completamente modelos de previsão de demanda, ou não forneceram resultados suficientemente satisfatórios. A principal contribuição deste trabalho é prestar auxílio aos usuários de tecnologia SIG na escolha de ferramentas mais adequadas e, secundariamente, evidenciar o potencial do uso de SIG *open source* em diversas etapas do planejamento de transportes. As mudanças no planejamento fomentam a hipótese de que o conceito de SIG-T possa ser adaptado e ampliado para Sistemas de Informação Geográfica aplicados à Mobilidade (SIG-M).

Palavras-chave: Planejamento de Transportes. Sistemas de Informação Geográfica. SIG *open source*. SIG-T. Planejamento da Mobilidade.

ABSTRACT

The results of transport planning depend on the choice and use of the most adequate tools for its development, therefore, it is essential to know the characteristics, functions and performance of the instrument that is to be used in the solution of problems. Researchers and planners often support their decisions in GIS (Geographic Information Systems) technology which, in the case of transportation planning, a particular segment of GIS, GIS-T (Geographic Information Systems applied to Transport) is used. The commonly used GIS-T are commercial software, therefore, this study aims to verify the possibility of using open source GIS in analyzes peculiar to transport. The verification was done through the application of specific techniques and routines to transportation planning in an open source GIS environment. The softwares used was QGIS, GRASS GIS and GeoDa. The results show that the three tools could be applied in several categories of transport analysis, however, they do not fit entirely into the category of GIS-T. The studied GIS were not able to fully apply demand prediction models or did not provide satisfactory results. The main contribution of this work is to assist GIS users in choosing the most appropriate tools and, secondarily, to highlight the potential of using open source GIS in several stages of transport planning. The changes in planning foster the hypothesis that the concept of GIS-T can be adapted and extended to Geographic Information Systems applied to Mobility (GIS-M).

Keywords: Transport Planning. Geographic Information Systems. Open source GIS. GIS-T. Mobility Planning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma básico de planejamento de transportes.....	18
Figura 2 - Modelo de quatro etapas.	21
Figura 3 - Centralidades definidas para amostragem da pesquisa OD de Joinville. .	40
Figura 4 - Georreferenciamento e ajuste das centralidades.....	41
Figura 5 - Adição de camadas a partir de conexão com um servidor.....	55
Figura 6 - Mapa de vias em Joinville com mais de 150 metros entre duas intersecções consecutivas.....	56
Figura 7- Mapa dos bairros de Joinville com população superior a 10000 e renda média inferior a R\$ 1500,00.	58
Figura 8 - Funcionamento do go2streetview.	59
Figura 9 - Mapa da densidade demográfica por bairro de Joinville.	60
Figura 10 - Diagnóstico da trafegabilidade para a rota do DI (08:00h).....	61
Figura 11- Diagnóstico da trafegabilidade para a rota do DI (10:00h).....	61
Figura 12 - Diagnóstico da trafegabilidade para a rota do DI (16:00h).....	62
Figura 13 - Diagnóstico da trafegabilidade para a rota do DI (18:00h).....	62
Figura 14 - Mapa dos setores censitários urbanos do IBGE em Joinville.	63
Figura 15 - Mapa dos pontos de ônibus do perímetro urbano de Joinville.	64
Figura 16 - Mapa de acessibilidade espacial ao transporte público urbano de Joinville.	65
Figura 17- Interface do complemento de caminho mais curto.....	66
Figura 18 - Menor caminho gerado.	67
Figura 19 - Pontos a seres atendidos na rede de Spearfish.	68
Figura 20 - Resultado para o problema do caixeiro viajante.	69
Figura 21 - Mapa de confiabilidade dos controladores de tráfego de Joinville.	70
Figura 22 - Nível de fluxo de veículos medido pelos controladores de Joinville.....	71

Figura 23 - Mapa de calor da população dos setores censitários x centralidades da pesquisa OD de Joinville.	73
Figura 24 - Mapa da geração de viagens por bairro de Joinville.	75
Figura 25 - Rede viária simplificada de Sioux Falls.	77
Figura 26 - Mapa da alocação tudo-ou-nada para Sioux Falls.	78
Figura 27 - Mapa de calor do uso de modo de transporte não motorizado por centralidade de Joinville.	81
Figura 28 - Mapa de calor do uso de transporte coletivo por centralidade de Joinville.	81
Figura 29 - Mapa de calor do uso de transporte individual por centralidade de Joinville.	82
Figura 30 - Rasterização da Figura 28.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aplicações do TransCAD e QGIS.	35
Tabela 2 - Velocidades e atrasos para o DI.	43
Tabela 3 - Insumos necessários e parâmetros de avaliação para a acessibilidade do transporte coletivo.	51
Tabela 4 - Diagnóstico da acessibilidade espacial a partir do indicador.	52
Tabela 5 - Seleção de vias em Joinville com mais de 150 metros entre duas intersecções consecutivas.....	57
Tabela 6 - Geração de viagens por bairro de Joinville.	74
Tabela 7 - Comparativo entre fluxos resultantes do AequilibraE e do algoritmo implementado.....	79
Tabela 8 - Avaliação dos SIG estudados.	84

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	14
1.1.Objetivos	16
1.1.1. <i>Objetivo geral</i>	16
1.1.2. <i>Objetivos específicos</i>	16
2.PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES	17
2.1.Modelo de Quatro Etapas	19
2.2.Considerações Sobre o Modelo de Quatro Etapas	22
3.SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA	24
3.1.Operações e capacidades essenciais para um SIG-T	25
3.1.1. <i>Operações genéricas de SIG aplicadas em SIG-T</i>	26
3.1.2. <i>Manipulação de matrizes</i>	26
3.1.3. <i>Análise de caminho mínimo</i>	27
3.1.4. <i>Problemas de roteirização</i>	27
3.1.5. <i>Partições, clusterização e regionalização</i>	27
3.1.6. <i>Localização de centros</i>	28
3.1.7. <i>Modelos de previsão de demanda</i>	28
3.1.8. <i>Visualização para dados e modelos de transporte</i>	28
3.1.9. <i>Operações e capacidades desejáveis em um SIG-T de ambiente dinâmico</i>	28
3.2.O software TransCAD	29
3.3.O software QGIS	31
3.4.Considerações sobre o TransCAD e ferramentas livres	34
4.MÉTODO	36
4.1.Dados necessários	36
4.2.Escolha e tratamento dos dados	37

4.2.1.Dados da cidade de Joinville.....	37
4.2.2.A pesquisa origem-destino de Joinville	38
4.2.3.Dados do desafio intermodal de Joinville	42
4.2.4.Dados da rede de Sioux Falls	44
4.2.5.Dados para rede de Spearfish.....	45
4.3. Ferramentas utilizadas	45
4.3.1.Pacotes de ferramentas do QGIS	45
4.3.2.O software GRASS GIS	46
4.3.3.O software GeoDa.....	46
4.4. Conhecimentos e técnicas necessárias	46
4.4.1.O problema do caixeiro viajante.....	46
4.4.2.Geração de viagens e regressão linear.....	47
4.4.3. Alocação de viagens e modelo de alocação tudo-ou-nada	49
4.4.4. Problema de caminhos mínimos	50
4.4.5. Acessibilidade espacial do transporte coletivo	50
4.4.6. Clusterização por k-médias.....	52
5.RESULTADOS.....	54
5.1. Operações básicas do QGIS aplicadas em estudos de transporte	54
5.1.1.Acesso à camadas através de conexão com um servidor.....	54
5.1.2.Consulta espacial e condicional	55
5.1.3.Coleta de dados e diagnóstico do sistema viário	58
5.1.4.Manipulação de atributos	60
5.1.5.Indicador da acessibilidade espacial do transporte público urbano.....	63
5.2 Análise de caminho mínimo.....	66
5.3 Problemas de roteirização	67
5.4 Problema de clusterização.....	69
5.5 Modelos de previsão de demanda aplicados	72

<i>5.5.1. Geração de Viagens em Joinville</i>	72
<i>5.5.2. Alocação de viagens na rede de Sioux Falls</i>	76
5.6. Visualização de dados	80
5.7. Síntese dos resultados	83
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
6.1. Sugestões para trabalhos futuros	86
REFERÊNCIAS	88

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional repercute em aumento da demanda por transportes, o que exige dos planejadores decisões eficientes e eficazes no aspecto operacional dos transportes nos centros urbanos. Os objetivos de reduzir custos e melhorar a qualidade dos serviços de transporte requerem altos níveis de capacitação dos planejadores e melhores ferramentas para auxiliar nas tomadas de decisão (ROSE, 2001).

Para tanto, a análise e projeção da demanda por transportes é essencial, e estas podem ser realizadas com o intuito de planejar grandes investimentos que requerem previsões de longo prazo. Quando se tem como objetivo fazer o planejamento de transportes de uma região, faz-se uso de modelos de previsão de demanda, que têm como base as relações dos transportes com as características espaciais e socioeconômicas da região estudada (CAMPOS, 2013).

Segundo Rose (2001), o sucesso do planejamento depende da escolha e uso de ferramentas adequadas para seu desenvolvimento. Estudos de previsão de demanda requerem alta complexidade de análise porque envolvem um vasto conjunto de dados. Com o desenvolvimento da tecnologia da informação, tornou-se possível armazenar esses dados em um ambiente computacional, enquanto no passado, esses registros eram feitos apenas em documentos e mapas em papel (CÂMARA; DAVIS, 2001).

A tecnologia da informação pode ser aplicada no planejamento de transportes a fim de engendrar sistemas de informação que auxiliem o planejador a conceber modelos de previsão de demanda que apoiem a tomada de decisão, para que a mesma seja realizada com maior confiabilidade e segurança.

Sistemas de informações podem representar graficamente um sistema de transporte através de coordenadas, que podem ser relacionadas com diversas informações através de um banco de dados georreferenciado disponibilizado pela tecnologia SIG (Sistemas de Informação Geográfica), ou seja, é possível visualizar

graficamente a situação presente e avaliar projeções futuras (TEIXEIRA; BATISTA; SENNE, 2002).

Os SIG-T (Sistemas de Informação Geográfica aplicados ao Transporte) são uma classe especial dos SIG, que possuem rotinas específicas para transportes, sendo aplicados particularmente na área de planejamento e operação de transportes.

Dentre os diversos softwares de SIG-T disponíveis no mercado, o TransCAD, desenvolvido pela Caliper Corporation, tem sido utilizado como referência nos estudos de planejamento de transportes, conforme verificado nos estudos realizados por Van der Waerden e Timmermans (1996), Teixeira et al. (2001), Carmo, Gomes e Barros (2003), Rose (2003), Santos e Raia (2006), Prata (2009), Silva, Oliveira e Lima (2011).

O levantamento histórico da aplicação do TransCAD aponta que ele é utilizado desde a década de 90 e que apresenta resultados satisfatórios como ferramenta de apoio à decisão. Entretanto, o acesso a essa ferramenta pode ser considerado oneroso, sendo que o preço anual da licença do software é elevado, de acordo com o website da Caliper.

Por outro lado, existem SIGs *open source* gratuitos, ou seja, os seus códigos-fonte podem ser adaptados para diferentes fins, incluindo rotinas específicas para o estudo de transportes, portanto, teoricamente, assim como o TransCAD, existem outros SIGs que podem ser utilizados como um SIG-T.

Diante do exposto, este estudo pretende avaliar a aplicabilidade e o potencial de SIGs *open source* como ferramentas de apoio à decisão no planejamento de transportes, tendo como principal justificativa o seu acesso gratuito. Sendo assim, essas ferramentas podem se tornar uma opção para planejadores com restrições orçamentárias e para a utilização em instituições de ensino como instrumento de aprendizado.

O principal objeto de estudo deste trabalho será a ferramenta QGIS, tal que, os SIG GRASS GIS e GeoDa serão utilizados para suprir possíveis limitações do QGIS. A validação da aplicabilidade das ferramentas será feita pelo emprego de rotinas e técnicas em ambiente SIG *open source* que podem ser utilizadas no planejamento de transportes. Para demonstrar a capacidade dos objetos de estudo, serão utilizados dados reais das cidades de Joinville e Spearfish, e dados fictícios da cidade de Sioux Falls.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Verificar a aplicabilidade e potencial de ferramentas SIG de código aberto como apoio à decisão no planejamento de transportes.

1.1.2. Objetivos específicos

- Analisar as capacidades de um SIG-T e os dados necessários para a sua utilização;
- Preparar bancos de dados de Joinville, Spearfish e Sioux Falls para efetuar estudos de transporte;
- Aplicar ferramentas do QGIS, GRASS GIS e GeoDa que podem ser utilizadas no planejamento de transportes;
- Avaliar a possibilidade de utilizar os SIGs de código aberto escolhidos como SIG-Ts.

2. PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES

O planejamento de transportes é uma área de estudo que objetiva adequar as necessidades de transporte de uma região ao seu desenvolvimento, de acordo com suas características estruturais, por meio do desenvolvimento de novos sistemas ou da melhoria dos sistemas existentes (CAMPOS, 2013).

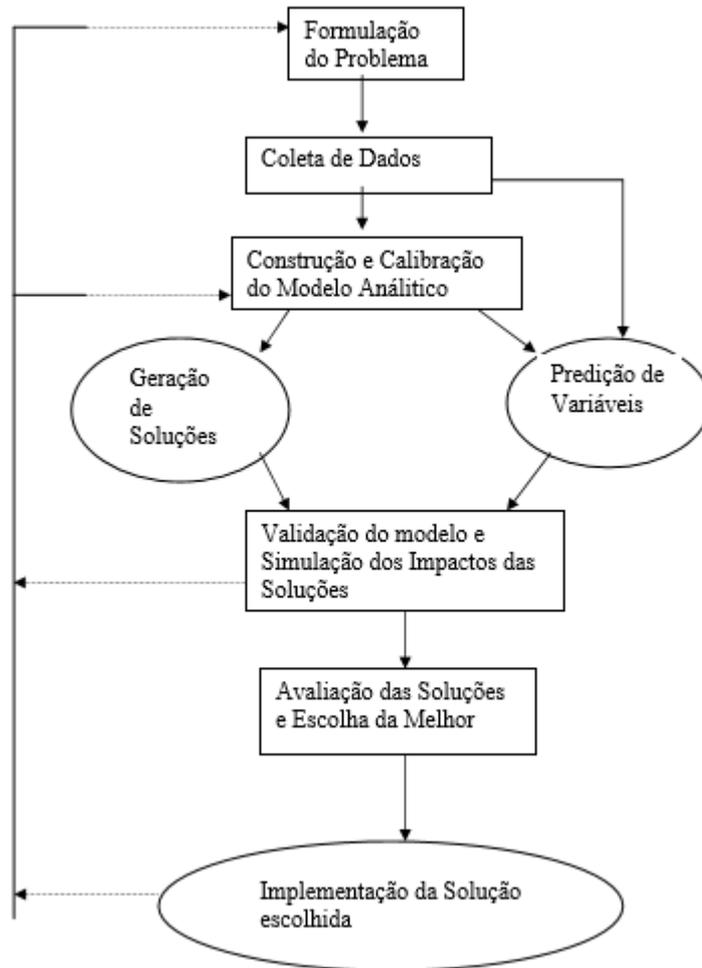
Para que a oferta de transportes seja estruturada, é necessário quantificar a demanda por transportes da área de estudo e prever como a mesma se distribuirá. A avaliação dessa demanda é feita através de modelos de planejamento. Esses modelos procuram definir o comportamento da demanda e, a partir daí, definir as alternativas que melhor se adaptarão à realidade da região estudada (CAMPOS, 2013).

De acordo com Campos (2013), um plano de transportes compreende os seguintes passos:

- 1 – Definição dos objetivos e prazos;
- 2 – Diagnóstico dos sistemas de transportes;
- 3 – Coleta de dados;
- 4 – Escolha dos modelos a serem utilizados para avaliação da demanda futura;
- 5 – Alternativas de Oferta de Transporte;
- 6 – Avaliação das alternativas (custos e impactos);
- 7 – Escolha da alternativa;
- 8 – Desenvolvimento do plano de transporte acompanhado de um programa de financiamento;
- 9 – Implementação das alternativas de acordo com um cronograma de desembolso de recursos;
- 10 – Atualização dos procedimentos.

O fluxograma apresentado na Figura 1 representa os passos básicos do planejamento de transportes:

Figura 1 - Fluxograma básico de planejamento de transportes.



Fonte: Campos (2013, p.3).

Dos passos do planejamento de transportes enumerados por Campos (2013), o passo número dois, três e quatro são os principais objetos deste estudo (diagnóstico dos sistemas de transporte, coleta de dados e escolha de modelos a serem utilizados para avaliação de demanda futura). O quarto passo compreende a escolha de modelo a ser utilizado para avaliação da demanda futura.

Para a previsão da demanda de transportes, deve-se inicialmente realizar um inventário detalhado das condições atuais da região de estudo. A região pode ser definida em zonas de tráfego com determinação dos movimentos realizados

entre cada par de zonas. O resultado é uma tabela de origens e destinos (Matriz O-D) (LOPES, 2005a).

Segundo Lopes (2005a), um dos modelos de planejamento largamente empregado é o modelo de quatro etapas, que permite a estimativa de viagens das pessoas entre diversas zonas de tráfego (matriz O-D), com base na consideração de que a realização de uma viagem depende de um processo desenvolvido em quatro fases bem definidas, denominado Modelo de Quatro Etapas.

2.1. Modelo de Quatro Etapas

O modelo de quatro etapas é um modelo sequencial e estático de previsão de demanda, que têm como base as relações a curto e médio prazo do transporte, com as características espaciais e socioeconômicas da região estudada. Para casos em que se deseja avaliar as relações em longo prazo considerando alterações no uso do solo, indica-se a escolha de outros métodos de planejamento (CAMPOS, 2013).

De acordo com Martin e Mcguckin (1998), o modelo de quatro etapas é utilizado há mais de 35 anos em estudos da previsão de demanda. Para Azevedo Filho (2012) esse modelo é considerado um método *tradicional* do planejamento dos transportes urbanos.

O modelo de quatro etapas é um modelo sequencial de previsão de demanda de transportes, ou seja, são executadas quatro etapas com objetivos claros e em ordem sequencial e, ao fim dessas etapas, obtém-se uma estimativa para a demanda futura por transportes em uma região estudada (CAMPOS, 2013).

Segundo Martin e Mcguckin (1998), Lopes (2005a) e Campos (2013), o modelo de quatro etapas compreende inicialmente uma coleta de dados. A partir dos dados necessários, aplicam-se os procedimentos do modelo que está dividido em quatro etapas brevemente descritas a seguir:

- Geração de Viagens: Determina a quantidade de viagens geradas (produzidas e atraídas) em cada zona de tráfego.
- Distribuição de Viagens: Determina a partir do número de viagens geradas em cada zona de tráfego, a distribuição das mesmas entre as demais zonas de tráfego, dessa forma obtendo uma matriz O-D das viagens;

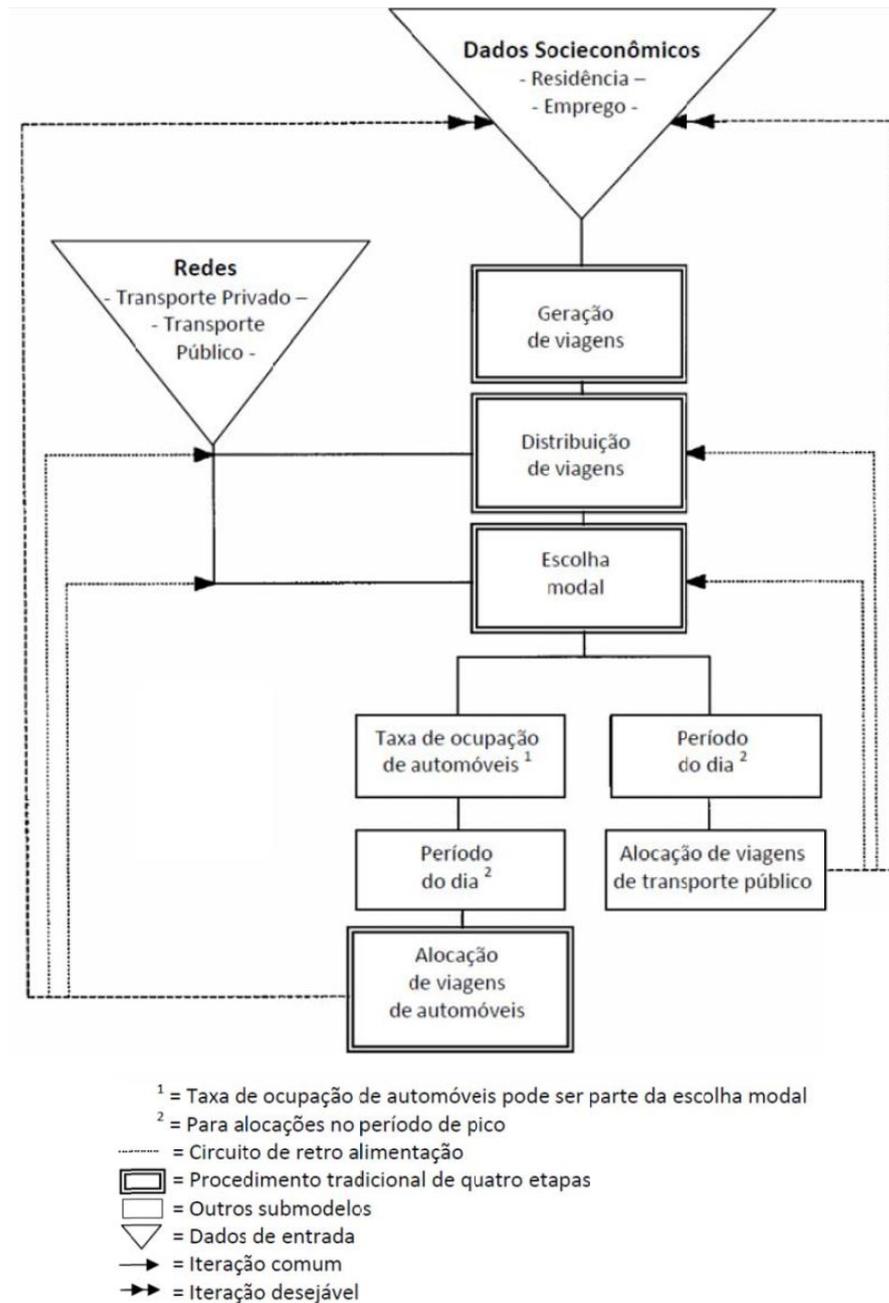
- Escolha Modal: Define a distribuição de viagens nos modos de transporte disponíveis na região estudada;
- Alocação de Viagens: Distribui o fluxo das viagens entre todas as rotas disponíveis na rede de transportes estudada.

Para Azevedo Filho (2012), essas etapas se destinam à criação de um modelo que explique o funcionamento atual de um determinado sistema de transportes, baseado na ocupação do solo das áreas de estudo e do tipo de atividades ali desenvolvidas.

Esse modelo é então calibrado para que represente a realidade atual, associando um determinado conjunto de variáveis socioeconômicas ao padrão de viagens verificado. Posteriormente, essas condições são projetadas para o futuro e alimentam o modelo, o que permite a estimativa dos perfis da demanda futura por transportes. Isso possibilita definir as necessidades de alteração na infraestrutura de transportes (AZEVEDO FILHO, 2012).

A Figura 2 apresenta um fluxograma descrevendo as etapas do modelo de quatro etapas.

Figura 2 - Modelo de quatro etapas.



Fonte: Martin e McGuckin (1998) apud Azevedo Filho (2012, p. 30).

O modelo de quatro etapas exige a manipulação de uma extensa quantidade de dados, portanto, o aumento da aplicação desse modelo só foi possível com o surgimento de microcomputadores (MARTIN; MCGUCKIN, 1998). O acesso a softwares e hardwares de menor custo fez disseminar o número de suas aplicações.

Para Lopes (2010), uma das ferramentas computacionais que facilita o uso desse modelo, são os Sistemas de Informação Geográficas (SIG) que atualmente

incluem pacotes de rotinas para transportes (SIG-T). A utilização dos SIG-T facilita a manipulação dos dados e a visualização dos resultados.

2.2. Considerações Sobre o Modelo de Quatro Etapas

Apesar da ampla utilização do modelo de quatro etapas em estudos de planejamento de transportes, existem considerações a serem feitas sobre a sua confiabilidade. O modelo de quatro etapas é criticado por Lopes (2010), principalmente pela falta de consideração dos impactos que alterações no sistema de transporte provocam no uso do solo.

As alterações como a inclusão ou melhorias da infraestrutura existente aumentam a acessibilidade de algumas zonas de tráfego, tornando-as mais atrativas para residências ou comércio, e o aumento da população e atividades nas zonas implica na necessidade de infraestrutura adicional (LOPES, 2010). Esses fatores não são considerados no modelo de quatro etapas.

Outro problema é que o modelo implicitamente trata a mudança no tempo como algo estático. O desenvolvimento urbano tem caráter dinâmico, ocasionando alterações entre as diferentes variáveis no modelo em um longo período de tempo. Dessa forma, projeções de longo prazo podem gerar erros nas estimativas (LOPES, 2010 apud LOPES; BRONDINO; SILVA, 2006). De acordo com Campos (2013), o modelo *tradicional* é apenas indicado para projeções de curto e médio prazo.

Além disso, segundo Vuchic (2005), a maioria dos estudos de previsão de demanda tem pouca confiabilidade, e para poucos estudos houve uma verificação da precisão das projeções após a rede de transportes ter sido implantada.

Para Azevedo Filho (2012), o planejamento *tradicional* enfatiza a quantidade de viagens em um menor intervalo de tempo, carece de conexão entre os modos de transporte, apenas acomoda e aceita tendências de demanda e ignora vários custos sociais e ambientais. Ao passo que no planejamento moderno é preciso enfatizar a qualidade e acessibilidade, fornecer a multimodalidade, procurar interromper ou reverter tendências ruins de demanda e incorporar os custos no planejamento e provisão.

Miller e Shaw (2015) afirmam que muitos currículos educacionais ainda são fortemente baseados nos modelos de planejamento de transportes desenvolvidos durante a metade do século 20, como é o caso do modelo de quatro etapas.

Segundo os autores, não há currículos apropriados para educar planejadores em como analisar modelos dinâmicos de planejamento.

Diante das considerações expostas, torna-se explícito o cuidado e atenção necessários na escolha de um modelo de planejamento de transportes. Antes de utilizar alguma ferramenta computacional de planejamento, é necessário ter conhecimento dos modelos e rotinas utilizadas por ela. É preciso adequar cada região de estudo e cada caso com o modelo mais apropriado para que se obtenham melhores resultados.

3. SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Avaliar as necessidades da população e das empresas operadoras é tarefa do planejamento de transporte, que deve estabelecer a infraestrutura necessária para a viabilidade do sistema de transporte, explicitando a tecnologia a ser utilizada e o nível de serviço ofertado. Devido à complexidade dessa tarefa, sistemas de informação são vitais no processo decisório envolvido no planejamento de transportes (MORLOK, 1978).

Sistemas de informação geográfica (SIG) são sistemas de gerenciamento de banco de dados computacionais que possibilitam capturar, armazenar, recuperar, analisar e visualizar dados espaciais (LEWIS, 1990). Segundo Heikkila (1998), todo SIG integra uma função de mapeamento com um gerenciador de banco de dados. O SIG apresenta inteligência geográfica, ou topologia, que facilita buscas baseadas em localizações espaciais e não apenas em valores de dados.

Um SIG permite ao usuário gerar saídas gráficas rapidamente, e resumir ou relacionar dados estatísticos em um contexto gráfico. Essa técnica gráfica fornece um método mais simples de avaliar resultados, particularmente com grandes conjuntos de dados (ROSE, 2001).

As principais funções que um SIG completo deve ter são: captura de dados, gerência de atributos, manipulação espacial, análise dos dados e saída dos dados. Outra potencialidade dos SIGs é a criação de mapas temáticos, unindo informações da base de dados e atributos ao mapa (ROSE, 2001 apud VIVIANI, 1998).

Lewis (1990) afirma que um sistema CAD difere de um SIG no sentido de que tipicamente o CAD possui mais procedimentos para criar e manipular objetos gráficos, mas não deduz e armazena informações sobre a relação entre os objetos, o CAD não cria ou armazena a topologia. Tanto os SIGs como os CADs trabalham com pontos, linhas e áreas, porém, os SIGs armazenam também as interrelações entre esses elementos.

As características expostas tornam o SIG a melhor ferramenta para solucionar problemas de organização de dados em modelos espaciais. Os SIG têm sido elemento chave para aprimorar o gerenciamento dos sistemas de transporte. Os SIG que são utilizados na engenharia de transportes possuem a denominação de SIG-T (ROSE, 2001).

Os SIG-T podem representar graficamente um sistema de transporte, através de coordenadas cartesianas que podem ser relacionadas com diversas informações através de um banco de dados georreferenciado. Dessa forma, é possível visualizar a situação presente e avaliar projeções futuras em um ambiente confiável com forte apelo gráfico (TEIXEIRA; BATISTA JR; SENNE, 2002).

Lopes, Brondino e Silva (2014) utilizaram ferramentas SIG para reforçar a hipótese que a inclusão de efeitos espaciais em modelos de regressão auxilia a encontrar melhores resultados na previsão de demanda por transportes. Esses resultados foram observados em um estudo de caso na cidade de Porto Alegre.

Lee e Oduor (2015) criaram um modelo “tudo-ou-nada” de alocação de fluxo através de um estudo de impedâncias tais como: padrões de tráfego, capacidade de vias e congestionamentos. Neste estudo foi empregada uma ferramenta SIG que, segundo os autores, pode manusear com eficácia algoritmos geoespaciais e funções de impedância considerando múltiplos atributos.

Zuidgeest, Brussel e van Marseveen (2015) afirmam que a utilização de SIG-Ts está remodelando o modo como planejadores de transporte estão coletando, explorando, sintetizando, avaliando e apresentando seus dados. Segundo os autores, as aplicações utilizando SIG-Ts se tornaram populares em conferências internacionais de transporte e em publicações de alto nível.

3.1. Operações e capacidades essenciais para um SIG-T

Essa seção revisa brevemente as capacidades mais importantes de um SIG-T de acordo com os estudos de Nyerges (1989), Waters (1999) e Loidl et al. (2016). O objetivo dessa revisão é estipular as características básicas a serem identificadas em uma ferramenta livre de sistemas de informação geográfica para que seja utilizada em estudos de transporte.

3.1.1. Operações genéricas de SIG aplicadas em SIG-T

Algumas das operações genéricas de um SIG que devem ser encontradas em um SIG-T são: edição de dados, visualização, capacidade de gerar relatórios e, funções de consulta espacial e condicional.

Uma das funções úteis para um SIG-T é a possibilidade de manipular atributos de um vetor para obter atributos inteiramente novos que possuam aplicações no planejamento de transportes. Por exemplo, dividir o comprimento de um arco de uma malha viária pelo limite de velocidade na intenção de estimar o tempo de viagem (ROWELL, 1996).

A possibilidade de editar dados espaciais é essencial. Quantificar o número de indivíduos com características socioeconômicas particulares que, residem dentro de uma distância caminhável de uma estação de transporte público auxiliaria o planejador a estimar a demanda por essa estação (WATERS, 1999).

A capacidade de visualização de um SIG-T normalmente permite a criação de uma variedade de camadas como: interseções, rodovias, centros populacionais, malhas viárias, importantes instalações públicas como hospitais, estações de polícia, departamentos de bombeiros e, limites administrativos, residenciais, industriais, comerciais, entre outros (WATERS, 1999).

3.1.2. Manipulação de matrizes

SIG usualmente armazenam dados de atributos de forma matricial. Nessas matrizes usualmente as linhas representam uma localização geográfica como, uma cidade, bairro ou zona de tráfego. Enquanto as colunas podem representar atributos dessa localização: população, frota de veículos, características socioeconômicas, entre outros.

Outra forma útil de armazenar dados é através de matrizes em que tanto as linhas como as colunas representam o mesmo conjunto de localizações geográficas. As linhas usualmente representam as origens e as colunas os destinos. Então, cada elemento da matriz pode armazenar informações como: tempo de viagem e distâncias (WATERS, 1999).

Essas matrizes são a base de muitas formas de análise em planejamento de transportes. Portanto, SIG-T devem ser capazes de criar, modificar; editar; e realizar

operações matemáticas e lógicas com essas matrizes. Algumas operações incluem encontrar o maior valor, o menor valor e possibilitar operações matemáticas entre as linhas e colunas (TAAFFEE; GAUTHIER; O'KELLY, 1996). Além disso, é útil conseguir copiar, transpor, importar e exportar matrizes em diferentes formatos (.csv, .txt, .xml, entre outros).

3.1.3. Análise de caminho mínimo

Encontrar o caminho de menor custo entre uma origem e um destino é útil para diversos estudos de transporte, inclusive para a etapa de alocação de viagens do modelo de quatro etapas mencionado anteriormente (ORTUZAR; WILLUMSEN, 2011).

Algoritmos de caminho mínimo devem ser altamente flexíveis para lidar com as diversas circunstâncias do mundo real. A ferramenta SIG-T deve ser capaz de armazenar uma variedade de diferentes dados para uma rede de tráfego como, por exemplo, número de faixas, capacidade e sentido da via. Além disso, deve conseguir encontrar o menor caminho em termos de tempo de viagem, distância e qualquer outro custo que possa ser considerado relevante ao estudo (WATERS, 1999).

3.1.4. Problemas de roteirização

Nos problemas de roteirização o usuário de uma ferramenta SIG-T busca encontrar rotas eficientes para atravessar um conjunto de nós e arcos em uma rede de transportes. Aplicações desses problemas incluem planejamento do transporte público; escolha de rotas para monitoramento e patrulhamento; limpeza de vias; entre outros (WATERS, 1999).

3.1.5. Partições, clusterização e regionalização

Uma aplicação comum em SIG-T é a criação de regiões a partir de uma base de dados. Essa aplicação pode ser utilizada, por exemplo, para obter uma área onde há regiões com uma carga de trabalho igual para monitoramento e patrulhamento policial (WATERS, 1999).

3.1.6. Localização de centros

Problemas de localização de centros buscam determinar locais ótimos para a instalação de infraestrutura pública e privada tais como, armazéns, fábricas, ambulatórios, estações de polícia, escolas, departamentos de bombeiros, entre outros. Para se determinar os locais ótimos, deve-se objetivar minimizar custos de serviço e minimizar custos máximos de serviço (comumente referido como problema de p -medianas) (WATERS, 1999).

3.1.7. Modelos de previsão de demanda

Segundo Waters (1999), um SIG-T deve conter pacotes de ferramentas que facilitem a aplicação de modelos de previsão de demanda por transporte. Para exemplificar, há o modelo clássico de quatro etapas, composto por etapas de geração de viagens, distribuição de viagens, escolha modal e alocação de viagens, conforme já descrito.

3.1.8. Visualização para dados e modelos de transporte

Um SIG-T precisa ao menos permitir a visualização dos resultados dos modelos de transporte apresentados em um plano cartográfico (DUEKER; PENG, 2008). As visualizações permitidas em 2D podem ser na forma de mapas de calor, campos vetoriais, grafos de mobilidade, redes mapeadas (volume de tráfego representado pela grossura dos arcos), trajetórias mapeadas, caminhos, entre outros (LOID et al., 2016).

3.1.9. Operações e capacidades desejáveis em um SIG-T de ambiente dinâmico

Conforme exposto anteriormente, o modelo de quatro etapas é amplamente utilizado no planejamento de transportes. Entretanto, esse modelo trata os dados de forma estática, e segundo Lopes, Brondino e Silva (2006), o desenvolvimento urbano tem caráter dinâmico.

A maioria das aplicações de SIG-T e modelos de transporte dependem de bases de dados relacionais ou orientadas a objetos. Essas abordagens são

adequadas para uso de dados estáticos, porém, os requerimentos para modelos de dados são diferentes em um ambiente dinâmico (LOID et al., 2016).

O atual desafio é designar modelos de dados que sejam flexíveis e capazes de lidar com uma grande quantidade de dados de diversas fontes, com diversos formatos e resoluções, assegurando um alto desempenho em tarefas de análise e visualização. Outra característica seria adequar a variação do tempo em bases de dados (MILLER; SHAW, 2015).

3.2. O software TransCAD

Considerando a utilidade de SIG-T como ferramentas de apoio a decisão no planejamento de transportes e a sua aplicabilidade em estudos de transporte, surge motivação para avaliar alguns dos softwares de SIG disponíveis no mercado.

De acordo com o enunciado neste trabalho, o TransCAD é uma das ferramentas SIG-T mais utilizadas em estudos de transportes. Portanto, é importante avaliar as possibilidades analíticas oferecidas pelo TransCAD e entender suas funções e possíveis limitações.

A Caliper Corporation foi fundada em 1983 e se especializa no desenvolvimento de Sistemas de Informação Geográfica e em softwares para estudos de transporte. Segundo a Caliper, o TransCAD é um SIG projetado especificamente para o planejamento, gerenciamento, operação e análise das características dos sistemas de transportes.

O TransCAD possui vários módulos para manipulação de dados com relação à entrada, armazenagem, análise e apresentação final. Suas aplicações podem ser em nível internacional, nacional, regional e local, podendo ser aplicado para qualquer modo de transporte isoladamente, ou combinado com outros modos.

Dados espaciais podem ser importados pelo TransCAD em diversas extensões (DXF, PCX, HPGL, dBASE, ASCII, ArcINFO, TIGER). Para a armazenagem desses dados são usados conjuntos de pontos, linhas e áreas. Os pontos contêm as coordenadas, as linhas são segmentos que se iniciam em um ponto e terminam em outro e as áreas são regiões delimitadas por fronteiras.

Esses conjuntos de pontos, linhas e áreas podem também armazenar atributos. Esses dados armazenados podem então serem utilizados para criar redes de transporte com parâmetros e características definidas pelo usuário. Para a

visualização desses dados, o TransCAD oferece várias possibilidades de apresentação. As mais importantes são apresentações geográficas em forma de mapas e de atributos em forma de tabelas.

O TransCAD possui diversas rotinas aplicadas a estudos de transporte além das funções de importação, criação, manipulação e visualização de dados. Algumas dessas rotinas permitem que o mesmo possa ser utilizado no desenvolvimento e manutenção de sistemas de transportes, previsão de demanda, gerenciamento de operações e roteirização e programação de veículos.

Com relação às rotinas do planejamento de transportes, o TransCAD possui todos os modelos clássicos, como o de 4 etapas, para cálculos de demanda de transportes. A ferramenta estima e aplica a etapa de geração de viagens em qualquer escala espacial, posteriormente, agrega aos níveis das zonas de tráfego, faz a distribuição de viagens e aloca o fluxo de viagens de acordo com uma análise da divisão dos modos de transporte disponíveis.

Além dos modelos clássicos e estáticos para previsão de demanda, o TransCAD aceita que se utilizem rotinas alternativas implementadas pelo usuário. Além de uma linguagem de programação própria, a ferramenta aceita procedimentos que podem ser definidos pelo usuário nas linguagens FORTRAN, C, JAVA e C++.

Conforme verificado na literatura, o TransCAD foi empregado em diversos estudos do planejamento de transporte. Waerden e Timmermans (1996) analisaram três projetos que utilizaram o TransCAD conduzidos por grupos de planejamento urbano da Eindhoven University of Technology e concluíram que o TransCAD é muito útil para o planejamento de transportes.

Santos e Raia Jr. (2006) utilizaram o TransCAD para distribuir espacialmente os acidentes em São Carlos e identificar tendências de deslocamento através da técnica de elipse de desvio padrão. Bielinski Jr., Raia Jr. e Silva (2008) apresentaram o TransCAD como ferramenta de geoprocessamento de apoio ao planejamento de pesquisas origem-destino no município de São Carlos, assim como, Silva, Oliveira e Lima (2011) aplicaram essa ferramenta para mapear e roteirizar o transporte coletivo na cidade de Itajubá.

Além do planejamento de transportes, o TransCAD pode ser usado em estudos de roteirização, conforme descrito nos trabalhos de Carmo e Gomes (2003) que utilizaram o TransCAD para otimizar o processo de roteamento de veículos em uma empresa jornalística no município de Fortaleza. Paula (2009) analisou a

distribuição urbana de cargas do setor atacadista-distribuidor para o setor varejista de supermercados com o auxílio do TransCAD, e Prata (2009) desenvolveu no TransCAD, através da linguagem de programação GISDK, um algoritmo para roteirização do transporte escolar rural.

A literatura mostra a ampla utilização do TransCAD em estudos de transportes. Segundo seus desenvolvedores, o TransCAD é a ferramenta mais utilizada no mundo para a previsão de demanda de transportes. Apesar disso, esse software além de não ser gratuito, o que pode dificultar o acesso aos planejadores, não oferece modelos dinâmicos de planejamento. Isso traz a motivação para conhecer outro SIG que possa cumprir um papel semelhante ao do TransCAD.

3.3. O software QGIS

O QGIS é uma ferramenta SIG gratuita e *open source* licenciada sob a GNU General Public License. Ele é um projeto oficial da Open Source Geospatial Foundation (OSGeo) e funciona nos sistemas operacionais: Linux, Unix, Mac OSX, Windows e Android e suporta dados vetoriais, raster e outros formatos e funcionalidades.

A denominação de código aberto refere-se, sobretudo, a softwares livres. Segundo Madeira (2011), o que melhor define um software como código aberto é a sua licença. Nessa licença estão vinculadas quatro regras que incrementam a livre distribuição do produto, sem prejuízo de crédito para o criador da aplicação. As quatro principais regras de licença devem respeitar os seguintes pontos:

I. Livre Distribuição

A licença não deve restringir a venda ou distribuição gratuita, mesmo que o programa seja componente de outro;

II. Código Fonte

O programa que é distribuído deve ser acompanhado do código fonte na sua versão já compilada. Caso o software não seja distribuído com o respectivo código, deve-se facilitar o acesso ao mesmo, podendo ser cobrado um valor apenas pela sua reprodução. O código deve ser legível e inteligível a qualquer programador;

III. Trabalhos Derivados

Este tipo de licença deve permitir a modificação do código para que se criem aplicações derivadas do original. Deve também permitir a distribuição dentro dos mesmos moldes que a licença original;

IV. Crédito ao autor do código fonte

A licença pode limitar a distribuição do código na sua forma modificada apenas se esta permitir a distribuição de arquivos patch (atualizações). A licença deve ainda, explicitar a permissão para a distribuição do software que foi construído a partir do código fonte modificado. No entanto, a licença pode exigir que os programas derivados tenham um nome ou número de versão diferente da aplicação original.

O primeiro SIG de código aberto foi criado em 1978. Além de ser pioneiro, tinha como principal característica a sua orientação para entidades vetoriais. Porém, os softwares livres passaram muito tempo ausentes do mercado, enquanto que, programas proprietários multiplicaram-se e extinguiram-se até que poucos se popularizaram e oligopolizaram o mercado (ANDRADE, 2011).

Somente a partir de 2000, universidades, departamentos do governo, agências de fomento e programadores perceberam que as geotecnologias tinham se restringido a dois ou três softwares e iniciaram uma espécie de revolução SIG. Ao longo da década de 2000, ao menos nove aplicativos foram desenvolvidos e estão à disposição do público para download. Dentre os desenvolvidos mais completos encontra-se o QGIS (ANDRADE, 2011).

O QGIS foi escolhido como principal ferramenta neste estudo porque segundo Medeiros (2012), ele é um software amigável em crescente popularidade. Além disso, os canais de suporte ao usuário da ferramenta estão sendo ampliados e uma rede de usuários publica constantemente extensões e plug-ins para a ferramenta.

Uma das caixas de ferramentas que se destacam para ser empregada neste trabalho é a AequilibraE que objetiva aplicar o modelo de quatro etapas, o que facilitaria a utilização do QGIS como uma ferramenta de previsão de demanda. Essa caixa de ferramentas propõe rotinas para análise topológica de uma rede de

transporte, calibração e aplicação do modelo gravitacional de distribuição de viagens, encontrar matrizes de menor custo entre as rotas de uma rede e resolver o problema da alocação de viagens.

A organização do projeto QGIS publica em seu site estudos de caso que destacam a aplicação prática do software. Acessando os documentos sobre o emprego do QGIS em diversos países, foi possível filtrar aplicações do QGIS especificamente em planejamento urbano ou de transportes, para assim verificar se o software pode ser utilizado como um SIG-T.

Oliani, Paiva e Antunes (2012) fazem uma comparação entre alternativas dentre softwares livres de geoprocessamento e se estas atendem às necessidades de gestão urbana em municípios com restrições orçamentárias. Os autores compararam os softwares TerraView, gvSIG e QGIS, e concluíram que o QGIS apresenta maior facilidade quanto à manipulação das ferramentas.

Ilarayaja (2013) utiliza a ferramenta de caminho mínimo no QGIS para conectar estradas na rede de tráfego em Neyveli na Índia. A base de dados encontrada pelo autor pode ser utilizada em diversas soluções em serviços de transporte e no controle de tráfego.

Bustos-Turu et al. (2015) conceberam através do QGIS uma ferramenta de simulação para planejamento integrado da rede de distribuição de energia para veículos elétricos na cidade de Londres na Inglaterra. A demanda de energia dos veículos elétricos foi caracterizada e também suas interações com o uso do solo, redes de transporte e infraestrutura de reabastecimento energético.

Rauf et al. (2015) utilizam o QGIS para analisar o comportamento das viagens dos estudantes de universidades públicas em Makassar na Indonésia. Os autores utilizaram modelos de regressão baseados em localização das residências dos estudantes, fatores socioeconômicos e fatores espaciais. Um achado significativo deste estudo foi a relação entre o custo do transporte e a distância percorrida até cada universidade.

A revisão da literatura sobre aplicações do QGIS mostra que ele tem sido empregado em estudos de transporte, apesar de que a ferramenta foi concebida e é utilizada, na maioria dos casos, somente como um SIG e não como um SIG-T. A utilização do QGIS como um SIG-T só é possível por causa de suas características *open source*, o que possibilita aos usuários e desenvolvedores a criação de rotinas para estudos de transporte.

3.4. Considerações sobre o TransCAD e ferramentas livres

O TransCAD é um software SIG-T comercial que usa principalmente modelos clássicos para a previsão de demanda de transportes. Para as necessidades atuais dos planejadores, foi exposto neste estudo que nem sempre o modelo de quatro etapas é o mais adequado.

O TransCAD permite ao usuário implementar rotinas diferentes das oferecidas pela ferramenta, justamente para os usuários que desejam fugir dos modelos clássicos. Entretanto, na maioria dos estudos revisados neste trabalho, rotinas além das oferecidas pela ferramenta não são implementadas. Além disso, o código fonte do software fica restrito somente aos desenvolvedores da ferramenta.

Por outro lado, ferramentas de código aberto oferecem mais liberdade para alterações nos códigos e para a disseminação de novas rotinas. Uma ferramenta com maior participação de sua comunidade e atualizações colaborativas pode ser mais adequada para as necessidades atuais do planejamento de transporte, sendo que os estudos de transporte estão em constante fase de adaptação e mudança conforme estudado por Lopes (2010), Azevedo Filho (2012) e Miller e Shaw (2015).

Além disso, ferramentas livres são gratuitas, e de mais fácil acesso para universidades e planejadores com restrições orçamentárias. Todos os aspectos expostos motivam o estudo de ferramentas código aberto, principalmente, os SIG, que, conforme Zuidgeest, Brussel e Marseeven (2015), são empregados em estudos de transporte de alto nível.

As aplicações do TransCAD e QGIS (ferramenta livre) revisadas neste trabalho estão organizados na Tabela 1 para que se identifique as relações dos objetos de estudo entre os autores revisados.

Tabela 1 - Aplicações do TransCAD e QGIS.

Estudos Revisados	Estudos que utilizam o TransCAD				Estudos que utilizam o QGIS			
	Planejamento Urbano	Planejamento de Transportes	Roteirização	Comparativo de SIGS	Planejamento Urbano	Planejamento de Transportes	Roteirização	Comparativo de SIGS
Rose				X				
Waerden et al.	X							
Santos et al. e Belinski et al.,		X						
Silva et al., Prata	X	X	X					
Oliani et al.								X
Carmo et al., Paula			X					
llarayaja, Rauf et al.					X	X		
Bustos-Turu et al.					X			

Fonte: Autor (2016).

Os estudos revisados mostram que o TransCAD é mais utilizado no planejamento de transportes, entretanto, llarayaja (2013) e Rauf et al. (2015) aplicaram o QGIS em estudos recentes de modelagem de transportes. Apesar disso, é verificada a ausência do emprego do QGIS em estudos de roteirização de transportes.

4. MÉTODO

Nesta etapa são descritos os elementos necessários para atingir os objetivos deste estudo. Na Seção 3.1. foram descritas as operações e capacidades essenciais para um SIG-T, portanto, os itens daquela Seção serviram como base de tarefas a serem executadas no QGIS.

Quando o QGIS esteve impossibilitado de realizar alguma tarefa da seção 3.1, ou houve outra ferramenta mais adequada para realização da tarefa, outra ferramenta SIG *open source* gratuita foi utilizada. Sempre que uma ferramenta diferente do QGIS foi utilizada, ela foi devidamente discriminada neste trabalho.

O trabalho foi realizado quase inteiramente em ambiente SIG, salientando que todos os SIGs utilizados são *open source* com licença livre de distribuição. Foi necessária também a utilização do Microsoft Excel e de programação em C++.

4.1. Dados necessários

Nesta seção são listados os dados empregados para a execução das tarefas da seção 3.1. em um ambiente SIG.

- Dados das poligonais que representam zonas de tráfego, limites municipais ou limites de bairros e que contenham informações geométricas, populacionais, socioeconômicas, entre outras;
- Dados vetoriais que representem malhas viárias contendo comprimento de cada arco e tempo de deslocamento médio entre eles. Para problemas de alocação de viagens também é desejável saber a capacidade e a velocidade de fluxo livre para cada arco;
- Localizações georreferenciadas de pontos e estações de transporte coletivo, controladores de tráfego, hospitais, entre outros;

- Volumes de tráfegos em diferentes horários para uma malha viária.

4.2. Escolha e tratamento dos dados

Foram utilizados dados de três localidades diferentes. A primeira localidade compreende o município de Joinville; a segunda, é uma rede simplificada da cidade de Sioux Falls na Dakota do Sul, utilizada para testes no problema de alocação de viagens; a terceira, é a rede da cidade de Spearfish, também localizada na Dakota do Sul, utilizada para testes no GRASS GIS.

4.2.1. Dados da cidade de Joinville

Os dados da cidade de Joinville foram fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), pelo Instituto de Pesquisa e Planejamento para o Desenvolvimento Sustentável de Joinville (IPPUJ) e por pesquisadores da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

O IPPUJ disponibiliza online a plataforma de Sistemas de Informações Municipais Georeferenciadas (SIMGeo), onde é possível fazer o download de vários dados georreferenciados no sistema de coordenadas SIRGAS 2000 do município de Joinville. Neste estudo foram utilizados arquivos contendo o perímetro urbano da cidade, os limites dos bairros, da malha viária urbana e da localização dos hospitais.

Além dos dados georreferenciados no SIMGeo, foi necessário georreferenciar a localização de todos os controladores de tráfego e pontos de ônibus da cidade. Essas informações foram disponibilizadas pelo IPPUJ em formato de planilhas.

As informações dos controladores continham o endereço e o tipo (radar ou lombada eletrônica) de cada controlador e o fluxo de veículos contabilizado por cada controlador no período de uma semana. O período em análise dos fluxos foi do dia 15 (domingo) de maio de 2016 até o dia 21 de maio (sábado). Os dados de fluxos foram divididos por dia da semana e por intervalos de 1 hora.

A contagem dos veículos estava dividida em 5 categorias de veículo: pequeno, médio, grande, moto e indeterminado. Neste trabalho foi atribuído aos veículos pequenos peso 1, médios e indeterminados peso 2, para os grandes foi adotado peso 3 e para as motos 0,5.

Os controladores foram categorizados por dia da semana, e cada dia teve uma base de pontos georreferenciada de controladores. Para cada uma dessas bases foram encontrados os valores de fluxo médio, fluxo máximo, hora-pico, desvio padrão e a confiabilidade nos valores encontrados. A verificação da confiabilidade foi necessária porque alguns controladores tiveram contagem de 0 veículos durante alguns períodos da coleta de dados, isso significa que eles não estavam operando corretamente nesse período.

Joinville possui um total de 35 controladores eletrônicos de tráfego, 32 foram georreferenciados como vetores do tipo ponto, utilizando a ferramenta MMMQGIS, que georreferencia pontos a partir de endereços com a utilização do sistema de referenciamento do Google Maps ou do Open Street Maps. Não foi possível georreferenciar todos os controladores porque nem todos continham informações válidas de endereço.

As informações dos pontos de ônibus incluíam seus endereços e suas coordenadas UTM, com um total de 1648 pontos. Os pontos foram georreferenciados de acordo com suas coordenadas da projeção UTM.

Além dos pontos do transporte coletivo, para um estudo de acessibilidade espacial foram necessários dados dos setores censitários do IBGE. Esses dados foram disponibilizados por unidade federativa do Brasil e em formato shape, os setores de Santa Catarina foram recortados para que apenas o perímetro urbano de Joinville fosse analisado, resultando em um total de 736 setores.

Os números da população urbana de Joinville estavam dispostos em uma planilha e foram vinculados ao shape dos setores censitários da cidade. Os dados populacionais utilizados são oriundos do censo demográfico realizado pelo IBGE em 2010.

4.2.2. A pesquisa origem-destino de Joinville

A pesquisa origem-destino (OD) coleta dados sobre as características socioeconômicas da população e sobre a localização das atividades urbanas, com o objetivo de identificar fatores que determinam o padrão das viagens, definindo suas origens, destinos, modos de transporte e horários. (ÂNTICO, 2005).

Para o estudo de demanda por transporte, mais especificamente, para o estudo de geração de viagens, foi utilizada uma pesquisa OD arquivada pelo IPPUJ,

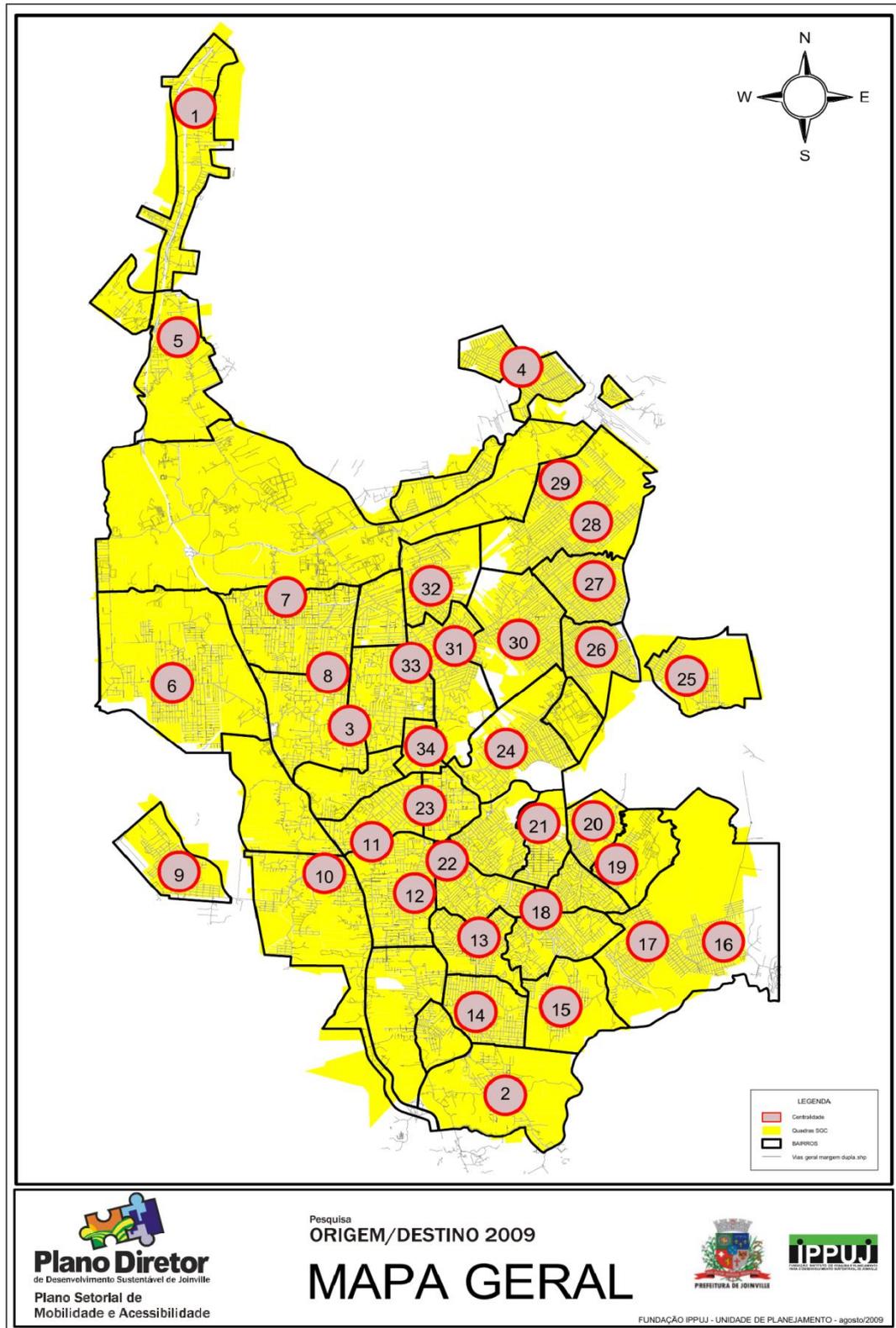
realizada em Joinville no ano de 2010 e duas planilhas com dados socioeconômicos de Joinville do ano de 2010 disponibilizadas pelo IBGE.

A pesquisa OD de 2010 foi encomendada pelo IPPUJ e pela Secretaria de Infra-estrutura Urbana de Joinville objetivando embasar o Plano Setorial de Mobilidade e Acessibilidade de Joinville que está vinculado ao Plano Diretor de Desenvolvimento Sustentável de Joinville. Os dados da pesquisa foram coletados por pesquisadores do Instituto de Pesquisa Catarinense durante o período de 1 a 30 de março de 2009 pelo método de entrevista domiciliar.

Os domicílios entrevistados se encontram em um universo de 34 centralidades de Joinville que foram discriminadas pelo IPPUJ. Essas centralidades podem ser representadas como áreas circulares em diferentes regiões do município. Para a seleção da amostra domiciliar foi utilizado o método probabilístico sistemático, sendo que o número de entrevistados em cada centralidade era proporcional à sua população total. O mapa dessas centralidades foi disponibilizado em portable document format (PDF) e, portanto, precisou ser georreferenciado para permitir análises em ambiente SIG.

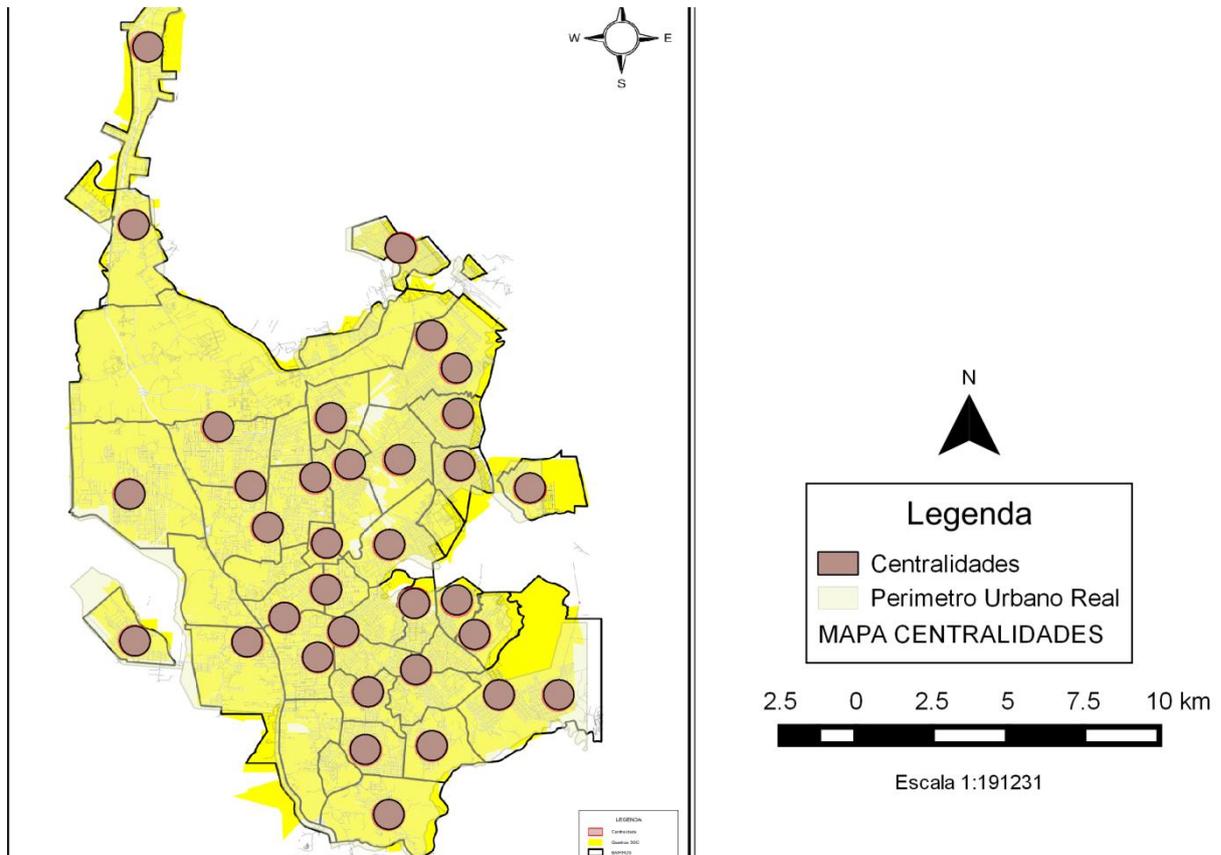
O método de rasterização de arquivos PDF não permite máxima precisão cartográfica, contudo, permite uma aproximação da realidade. Como não se obteve acesso aos mapas das centralidades em outros formatos, essa aproximação foi empregada para análise dos dados da pesquisa OD. A Figura 4 mostra a localização das centralidades, comparando o PDF ajustado e o limite urbano real do município. As centralidades foram vetorizadas como um círculo de raio de 500 metros, conforme as figuras 3 e 4.

Figura 3 - Centralidades definidas para amostragem da pesquisa OD de Joinville.



Fonte: IPPUJ (2009).

Figura 4 - Georreferenciamento e ajuste das centralidades.



Fonte: Autor (2016).

A pesquisa OD foi realizada com uma amostra de 2397 entrevistas domiciliares e para cada uma delas, as seguintes informações foram coletadas: centralidade em que a pesquisa foi realizada, com quantas pessoas o entrevistado divide a residência, qual a posição econômica do entrevistado dentro da residência, e as viagens realizadas pelo entrevistado no dia anterior. A respeito das viagens, a planilha continha informações de bairro de origem, bairro de destino, horários de início e término da viagem, motivo da viagem e modo de transporte utilizado.

Os dados socioeconômicos extraídos do IBGE estavam dispostos em uma planilha onde cada linha representava um bairro e cada coluna continha o número de domicílios, população, média de moradores por domicílio, renda média por habitante e renda média por residência. Dados de 2010 do número de empregos em cada bairro de Joinville coletados pelo IPC foram adicionados a essa planilha de dados socioeconômicos.

Após o tratamento dos dados da pesquisa OD e dos dados socioeconômicos do IBGE, as planilhas foram vinculadas aos arquivos shape contendo os limites dos

bairros do município de Joinville. Dessa forma, cada polígono que representa um bairro de Joinville pode armazenar informações relevantes à análise de demanda por transportes, tornando possível aplicar modelos de geração de viagens em ambiente SIG.

4.2.3. *Dados do desafio intermodal de Joinville*

O Desafio Intermodal (DI) de Joinville é um evento anual realizado pela UFSC em parceria com órgãos municipais, e tem o objetivo de comparar o desempenho de diferentes modalidades de transporte em uma rota única com o mesmo ponto de origem e de destino.

Todos os participantes do Desafio devem partir da mesma origem no mesmo horário e ao chegarem ao destino, deve-se avaliar o tempo total das viagens, assim como outros fatores relevantes ao deslocamento. O ponto inicial do Desafio é a UFSC (Rua Presidente Prudente de Moraes) e o final é o Museu da Bicicleta (Avenida Getúlio Vargas).

No dia 22 de setembro de 2016, pesquisadores da UFSC coletaram dados de transporte motorizado individual referentes à rota do Desafio Intermodal. As coletas foram feitas por meio de uma ferramenta desenvolvida por Lopes (2005b), o CAATP (Coleta e Análise Automática de Tempos de Percurso). A coleta de dados foi feita em quatro períodos do dia: às 08:00 horas (pico da manhã), 10:00 horas, 16:00 horas e 18:00 horas (horário de pico).

O resultado da coleta foi registrado em 4 planilhas (uma para cada período), contendo dados de tempo de percurso, velocidades, distâncias percorridas, atrasos (tempo parado total por segmento), motivo dos atrasos, entre outras informações. Os dados estavam divididos em 21 segmentos que completavam a rota total do DI, esses segmentos foram georreferenciados e a cada um deles foi vinculado as velocidades e tempo de atraso para cada período do dia da coleta.

A partir dos quatro períodos, foi feita uma média aritmética simples de velocidades e atrasos por segmento, ou seja, para cada segmento foi somado a velocidade registrada as 08:00h, 10:00h, 16:00h e 18:00h e o resultado da soma foi dividido por 4. O mesmo cálculo foi aplicado para os tempos de atraso. O resultado para a coleta de dados e cálculo das médias está disposto na Tabela 2.

Tabela 2 - Velocidades e atrasos para o DI.

Segmento	Velocidades (km/h)					Atrasos (s)				
	08:00h	10:00h	16:00h	18:00h	Média	08:00h	10:00h	16:00h	18:00h	Média
1	16,41	25,36	11,50	9,46	15,68	23	146	53	24	61,5
2	37,50	42,71	43,32	39,43	40,74	7	0	0	0	1,75
3	39,69	46,70	49,61	52,92	47,23	0	0	0	0	0
4	34,72	33,65	37,71	37,07	35,79	7	5	0	0	3
5	35,79	19,44	25,82	16,24	24,32	0	26	4	31	15,25
6	35,97	30,44	35,97	24,73	31,78	0	0	0	0	0
7	11,22	38,34	11,50	8,52	17,40	23	0	23	31	19,25
8	31,94	8,16	27,38	3,14	17,66	0	34	0	139	43,25
9	30,70	7,51	18,31	3,81	15,08	0	127	12	360	124,75
10	21,50	7,43	7,85	6,10	10,72	0	35	30	33	24,5
11	30,06	25,77	24,05	20,04	24,98	0	0	0	0	0
12	15,23	18,10	14,53	6,71	13,64	30	18	32	153	58,25
13	19,84	39,68	12,28	13,58	21,35	17	0	53	44	28,5
14	39,67	52,89	45,33	39,67	44,39	0	0	0	0	0
15	31,62	16,69	18,20	17,16	20,92	0	29	30	29	22
16	36,81	58,46	43,21	25,48	40,99	0	0	0	6	1,5
17	4,51	6,45	14,10	6,84	7,97	20	8	0	6	8,5
18	49,51	48,13	26,66	11,87	34,04	0	0	24	51	18,75
19	27,31	40,16	23,54	13,39	26,10	0	0	0	19	4,75
20	38,45	38,45	34,61	31,46	35,74	0	0	0	0	0
21	48,20	13,30	36,72	16,41	28,66	0	34	0	13	11,75

Fonte: Autor (2016).

Para cada período, foi avaliada a condição de trafegabilidade por segmento da rota em detrimento à sua trafegabilidade geral (média dos desempenhos). A trafegabilidade por segmento foi categorizada como boa, média ou ruim. Os critérios lógicos escolhidos para a categorização da trafegabilidade foram:

- Trafegabilidade boa: velocidade pontual > média de velocidades e atraso pontual < média de atrasos;
- Trafegabilidade média: (velocidade pontual <= média de velocidades e atraso pontual <= média de atrasos) ou (velocidade pontual >= média de velocidades e atraso pontual >= média de atrasos).

- Trafegabilidade ruim: velocidade pontual < média das velocidades e atraso pontual > média de atrasos.

O objetivo de classificar a trafegabilidade é definir o comportamento dos deslocamentos na rota ao longo do dia. Velocidades menores e maior tempo de atraso normalmente indicam situação de congestionamento, portanto é possível detectar volumes anormais de veículos a partir da medição de velocidades e atrasos em percurso.

4.2.4. Dados da rede de Sioux Falls

A rede de Sioux Falls empregada neste trabalho foi baseada na rede de tráfego da cidade de Sioux Falls na Dakota do Sul. A rede utilizada não é considerada realística porque possui apenas 24 nós e 76 arcos, sendo que a cidade real possui muito mais intersecções e vias. Entretanto, a rede é grande o suficiente para testes e para resolver problemas de alocação de viagens.

Os arquivos da rede Sioux Falls utilizados foram tratados a partir do formato de texto. Um dos arquivos continha as coordenadas de cada nó, enquanto outro continha as seguintes características de cada arco: nó inicial, nó final, capacidade, comprimento, velocidade de fluxo livre, parâmetros α e β^1 , velocidade limite, pedágio e tipo do arco. O último arquivo dispõe os fluxos de viagem entre cada par OD.

Os dados da rede Sioux Falls podem ser encontrados no trabalho de alocação de viagens de LeBlanc, Morlok e Pierskalla (1975). Todos os dados tiveram de ser organizados por um algoritmo em C++ para que estivessem dispostos de forma a serem facilmente vinculados aos dados vetoriais da rede em ambiente SIG. Os dados foram organizados em forma de tabela de atributos e vinculados à vetores do tipo ponto e linha.

¹ Parâmetro α é a razão do tempo de viagem por unidade distância em condições de fluxo livre e o parâmetro β determina quão rápido a velocidade média estimada para cada arco diminui enquanto transita da condição de fluxo livre para condição de congestionamento. (MTOI; MOSES, 2014).

4.2.5. *Dados para rede de Spearfish*

A rede de Spearfish, Dacota do Sul, é um banco de dados clássico do GRASS GIS existente desde 1980. A rede contém dados raster e vetoriais, ela foi utilizada para resolução de procedimentos que não puderam ser executados no QGIS, mas que podem ser executados no GRASS GIS.

Os dados da rede estão disponíveis na seção de sample data no site oficial do GRASS GIS. Os dados utilizados neste trabalho se referem às estradas do condado de Lawrence.

4.3. Ferramentas utilizadas

Esta seção lista os softwares SIG utilizados, assim como alguns pacotes de ferramentas necessários para a realização deste estudo.

4.3.1. *Pacotes de ferramentas do QGIS*

O SIG QGIS é o principal objeto deste estudo e já foi suficientemente descrito na seção 3.3. A versão do QGIS adotada foi a 2.8.9, além das operações básicas da ferramenta, os seguintes complementos foram utilizados:

- Complemento de caminho mais curto – ferramenta necessária para análises de caminho mínimo;
- Go2streetview – plugin que permite acessar imagens do Google Street View pelo QGIS a partir das coordenadas de camadas várias abertas;
- MMQGIS – complemento utilizado para georreferenciar pontos através de endereços e para geração de buffers, que auxiliam a visualizar e diagnosticar a acessibilidade espacial do transporte coletivo;
- Attribute Base Clustering – ferramenta que encontra clusters baseado nos atributos e pesos de uma base de dados;
- AequilibraE – pacote de ferramentas utilizado para a preparação de redes de tráfego, obtenção de matrizes de distância e resolução do problema de alocação de viagens.

4.3.2. O software GRASS GIS

O GRASS GIS é um SIG de código aberto gratuito que foi utilizado para estudos de roteirização. As camadas do GRASS GIS, assim como suas rotinas vetoriais, podem ser acessadas e utilizadas pelo QGIS através da instalação de todos os complementos.

O GRASS GIS foi o único SIG de código aberto encontrado que efetua rotinas de roteirização, neste estudo a rotina aplicada foi a do caixeiro viajante, chamada de *v.net.salesman*. O problema do caixeiro viajante será melhor descrito na seção 4.4.1.

Apenas alguns comandos do GRASS puderam ser encontrados através da caixa de ferramentas de processamento do QGIS, e a rotina para o problema do caixeiro viajante não pode ser encontrada. Portanto, o estudo do caixeiro viajante foi realizado diretamente no GRASS GIS. A versão do GRASS GIS utilizada é a 7.0.4.

4.3.3. O software GeoDa

O GeoDa é uma ferramenta gratuita e de código aberto usada para introduzir à análise espacial. A ferramenta possibilita clássicas regressões lineares simples, múltiplas e regressões espaciais. O GeoDa foi utilizado para a resolução do problema de geração de viagens.

O QGIS possibilita cálculos de regressão linear com a instalação do módulo R. Entretanto, o R permite apenas regressões simples e se mostrou mais instável do que o GeoDa. Portanto, optou-se pela utilização da versão 1.8 do GeoDa.

4.4. Conhecimentos e técnicas necessárias

Esta seção descreve algumas teorias e técnicas de planejamento de transportes utilizadas na resolução deste trabalho.

4.4.1. O problema do caixeiro viajante

Dada uma rede $G = (N, A, C)$, onde N é o conjunto de nós, A é o conjunto de arcos e $C = [c_{ij}]$, sendo que c_{ij} representa o custo ou a distância do movimento do

nó i para o nó j , o problema do caixeiro viajante requer um ciclo hamiltoniano² em G de forma a minimizar o custo total do ciclo (BODIN et al., 1983).

O problema do caixeiro viajante é um problema NP-completo, isso implica que um algoritmo com solução exata para este problema é improvável de existir. Entretanto, muitas heurísticas (soluções aproximadas) foram desenvolvidas para a resolução desse problema (BODIN et al., 1983).

4.4.2. Geração de viagens e regressão linear

A geração de viagens faz parte do modelo de quatro etapas, que foi previamente introduzido na seção 2.1. A geração de viagens objetiva determinar a quantidade de viagens geradas (produzidas e atraídas) em cada zona de tráfego de uma rede de transporte (CAMPOS, 2013). A quantidade de viagens geradas pode ser estimada de várias maneiras utilizando dados de pesquisas OD ou dados socioeconômicos de cada zona. Os dados socioeconômicos podem ser: população, número de empregos na zona, frota veicular, etc. (ORTUZAR; WILLUMSEN, 2011).

Segundo Orutzar e Willumsen (2011) regressões lineares são a estimativa inicial recomendada para problemas de geração de viagem. A regressão linear simples é uma tentativa de estabelecer uma equação matemática linear que descreva o relacionamento entre duas variáveis. Quando ela tenta descrever mais de duas variáveis, é chamada de regressão linear múltipla (STEVENSON, 2001).

O modelo de regressão linear múltipla pode ser descrito como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k + E \quad (1)$$

Onde:

- Y = variável dependente;
- $X_1 \dots X_k$ = variáveis explicativas ou independentes medidas sem erro;
- $\beta_0 \dots \beta_k$ = parâmetros desconhecidos do modelo (a estimar);
- E = variável aleatória na qual se procura incluir todas as influências no comportamento da variável Y que não podem ser explicadas

² Um ciclo Hamiltoniano é um ciclo passando por cada nó N somente uma única vez e retornando ao nó inicial ao fim do ciclo. (BODIN et al., 1983).

linearmente pelo comportamento das variáveis explicativas e os possíveis erros de medição.

No problema de geração de viagens, o número de viagens produzidas ou atraídas por uma zona de tráfego toma forma da variável dependente, enquanto tantas outras variáveis podem ser consideradas explicativas; como por exemplo: população da zona, número de pessoas empregadas, frota veicular, entre outros (ORTUZAR; WILLUMSEN, 2011).

Na prática, um modelo de regressão linear não representa com perfeição a relação entre a variável dependente e as variáveis explicativas. Isso acontece, porque existe um grande número de outras variáveis que normalmente acabam não entrando na análise de regressão. Esse fenômeno de erros associados à predição do comportamento da variável dependente se chama dispersão (STEVENSON, 2001).

Devido à dispersão, é necessário estar atento às variáveis explicativas utilizadas em análises de regressão, assim como, quanto à qualidade dos dados utilizados. Para determinar a magnitude com a qual a variável dependente e as variáveis explicativas estão relacionadas, é possível calcular o coeficiente de determinação (r^2) (STEVENSON, 2001).

O coeficiente de determinação pode ser calculado da seguinte forma:

$$r^2 = \frac{\text{variação total} - \text{variação não explicada}}{\text{variação total}} \quad (2)$$

O valor de r^2 pode variar de 0 a 1. Quando a variação não explicada constitui uma grande percentagem da variação total, r^2 será pequeno. Inversamente, quando a dispersão em torno da reta da regressão é pequena em relação à variação total dos valores de Y , a variação explicada responde por uma grande percentagem da variação total e r^2 estará próximo de 1. Isso significa que existe uma forte relação entre a variável dependente e as variáveis explicativas (STEVENSON, 2001).

Neste trabalho foi aplicada a técnica de regressão linear múltipla para a estimativa da geração de viagens para 41 bairros da cidade de Joinville. Os dados escolhidos como variáveis explicativas foram os dados do censo de 2010 do IBGE

de população e renda média por habitante e o número de empregos por bairro fornecidos pela Pesquisa OD de 2010. O coeficiente de determinação r^2 foi utilizado como parâmetro para verificar a qualidade da análise de regressão.

4.4.3 Alocação de viagens e modelo de alocação tudo-ou-nada

O número de viagens que acontecem em um determinado momento em qualquer rua, intersecção, ou rota de tráfego em uma área urbana é resultado de decisões individuais dos usuários do sistema de transporte. O objetivo da alocação de viagens é modelar matematicamente as decisões dos usuários para que se obtenham padrões de fluxo de viagens através da rede de transportes urbana (SHEFFI, 1985).

Segundo Sheffi (1985) e Ortuzar e Willumsen (2011), existem vários fatores que podem influenciar as decisões dos usuários ao realizar deslocamentos pela malha de transportes. Os autores afirmam que essas decisões dependem de quão congestionado o sistema de transportes está, do custo associado ao transporte e do conforto oferecido.

Neste estudo, o único fator considerado como explicativo para os fluxos de viagens foi o tempo de viagem, desconsiderando o efeito de congestionamentos. Essa escolha foi feita porque não foram encontradas ferramentas SIG livres que pudessem resolver o problema de alocação de viagens que considerassem o princípio de equilíbrio de Wardrop³. O modelo de alocação de viagens que desconsidera efeitos de congestionamento é chamado de alocação tudo-ou-nada (ORTUZAR; WILLUMSEN, 2011).

A ausência dos efeitos de congestionamento significa que o custo nos arcos de uma rede de transporte é fixo. O pressuposto de que todos os usuários da rede percebem o mesmo custo resulta em que todas as viagens com o mesmo par OD também escolherá a mesma rota. Portanto, todos os usuários são alocados a somente uma rota entre cada par OD e nenhum deles escolhe rotas menos atrativas (ORTUZAR; WILLUMSEM, 2011).

Os dados que alimentaram o modelo tudo-ou-nada de alocação de viagens foram os da rede de Sioux Falls, descrita na seção 4.2.2. A rede contém dados da

³ Na condição de equilíbrio, o custo de viagem nas rotas utilizadas é igual ou inferior aos custos das rotas não utilizadas. (WARDROP, 1952).

infraestrutura da rede viária, incluindo interseções e sentido das vias, a demanda por viagens e o tempo de viagem para cada arco na condição de fluxo livre.

4.4.4 *Problema de caminhos mínimos*

Para resolver um problema de alocação tudo-ou-nada é necessária a utilização de um algoritmo de caminho mínimo (LEE; ODUOR, 2015). Neste estudo, a alocação tudo-ou-nada foi resolvida no QGIS e para verificação dos resultados o algoritmo de caminho mínimo elaborado por Dijkstra⁴ (1959) foi aplicado na rede de Sioux Falls.

Também foi utilizado o QGIS para análise de menor caminho sem que fosse feita alocação de fluxo de veículos. Essas análises foram realizadas através do complemento de caminho mais curto que também funciona baseado no algoritmo de Dijkstra (1959) (ILARAYAJA, 2013).

4.4.5 *Acessibilidade espacial do transporte coletivo*

A acessibilidade se relaciona com as oportunidades que um indivíduo possui para realizar uma atividade em particular ou uma série de atividades. Ela está relacionada com a localização espacial das oportunidades relativas ao ponto de origem e de destino do indivíduo. Dessa forma, o nível de acessibilidade é determinado pela oportunidade ou o potencial disponibilizado pelo sistema de transporte e pelo uso do solo, para que diferentes tipos de pessoas desenvolvam suas atividades (JONES, 1981 apud HENRIQUE, 2004).

No caso do transporte coletivo, aquilo que define o nível de sua acessibilidade é a facilidade de chegar ao local de embarque e de sair do local de desembarque até alcançar o destino final. Essa facilidade pode ser quantificada através da distância percorrida pelo usuário até o ponto de ônibus mais próximo (LÜBECK et al., 2011).

Segundo Ferraz e Torres (2004), o transporte coletivo com um bom nível de acessibilidade deve possuir uma distância de caminhada no início e no fim da

⁴ O algoritmo elaborado por Dijkstra encontra o caminho de menor custo entre um nó inicial e um nó final em problemas de conexão com grafos. (DIJKSTRA, 1959).

viagem menor do que 300 metros para todos os usuários. Essa distância será a referência para o estudo de caso feito em Joinville.

Costa (2008) desenvolveu uma ferramenta para diagnóstico e monitoramento da mobilidade urbana sustentável. Essa ferramenta foi denominada de Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (IMUS). Esse índice é constituído de uma hierarquia de critérios que agrega 9 domínios, 37 temas e 87 indicadores. O IMUS apresenta ainda escalas de avaliação para cada indicador, sendo que um dos indicadores objetiva avaliar a acessibilidade espacial do transporte coletivo.

Baseado nos trabalhos de Ferraz e Torres (2004) e Costa (2008), a tabela a seguir foi organizada contendo o tema, indicador, insumos necessários para cálculo do indicador e os seus parâmetros de avaliação.

Tabela 3 - Insumos necessários e parâmetros de avaliação para a acessibilidade do transporte coletivo.

Tema	Indicador	Dados de Base	Parâmetro de avaliação
Acessibilidade aos sistemas de transporte	Acessibilidade espacial ao transporte público	Base georreferenciada de pontos de ônibus	Distância de caminhada no início e no fim da viagem < 300m
		Base georreferenciada do município	
		Base georreferenciada de Setores Censitários	

Fonte: Autor (2016) adaptado de Ferraz e Torres (2004) e Costa (2008).

Pereira (2013) realizou um estudo da cidade de Joinville baseado no IMUS, entretanto, em seu trabalho o indicador referente à acessibilidade espacial do transporte público não foi calculado. Esse indicador foi calculado neste trabalho com base nos estudos de Ferraz e Torres (2004), Costa (2008) e Moraes (2012), objetivando complementar o trabalho de Pereira (2013).

O indicador em Joinville foi obtido pelo número de habitantes residentes na área de cobertura de um ponto de acesso aos serviços de transporte público dividido pela população urbana total da cidade. A fórmula utilizada para o cálculo foi a seguinte:

$$I = \frac{\sum_i^N \frac{P_i a_i}{A_i}}{P_T} \quad (3)$$

Onde:

- I = Indicador de acessibilidade espacial;
- N = número de setores censitários urbanos do IBGE em Joinville;
- P_i = população total do setor censitário i ;
- a_i = área do setor censitário i atendida pelo transporte público;
- A_i = área total do setor censitário i ;
- P_T = população urbana total de Joinville.

O valor do indicador pode variar de 0 a 1, sendo que segundo Morais (2012), esses valores podem ser conceituados de acordo com a Tabela 3, utilizada como referência qualitativa para o diagnóstico da acessibilidade espacial do transporte público urbano em Joinville.

Tabela 4 - Diagnóstico da acessibilidade espacial a partir do indicador.

Conceito	Valor do indicador
Muito Bom	0,90 – 1
Bom	0,75 - 0,90
Regular	0,55 - 0,75
Ruim	0,30 - 0,55
Muito Ruim	0 - 0,30

Fonte: Autor (2016) adaptado de Costa (2008) e Morais (2012).

4.4.6. Clusterização por k -médias

Segundo Wagstaff et al. (2001), a clusterização por k -médias consiste em agrupar n observações em k clusters. Os algoritmos de k -médias procedem selecionando centroides iniciais para cada k e então interagem da seguinte forma:

1. Cada observação n é designada para o cluster que possui o centroide mais próximo.
2. Cada k tem seu centroide atualizado para ser a média das instâncias que o compõe.

O algoritmo então converge quando não existem mais variações nos centroides de cada cluster. Para MacQueen (1967), o método das k -médias normalmente agrupa as observações por meio de distâncias euclidianas medidas em um sistema de coordenadas. Entretanto, neste trabalho foi feita uma clusterização por atributos, isso significa que as n observações estão dispostas em um plano em que cada eixo representa o valor de um atributo.

5. RESULTADOS

Neste capítulo serão descritos os resultados obtidos com a aplicação do método discutido no capítulo 4.

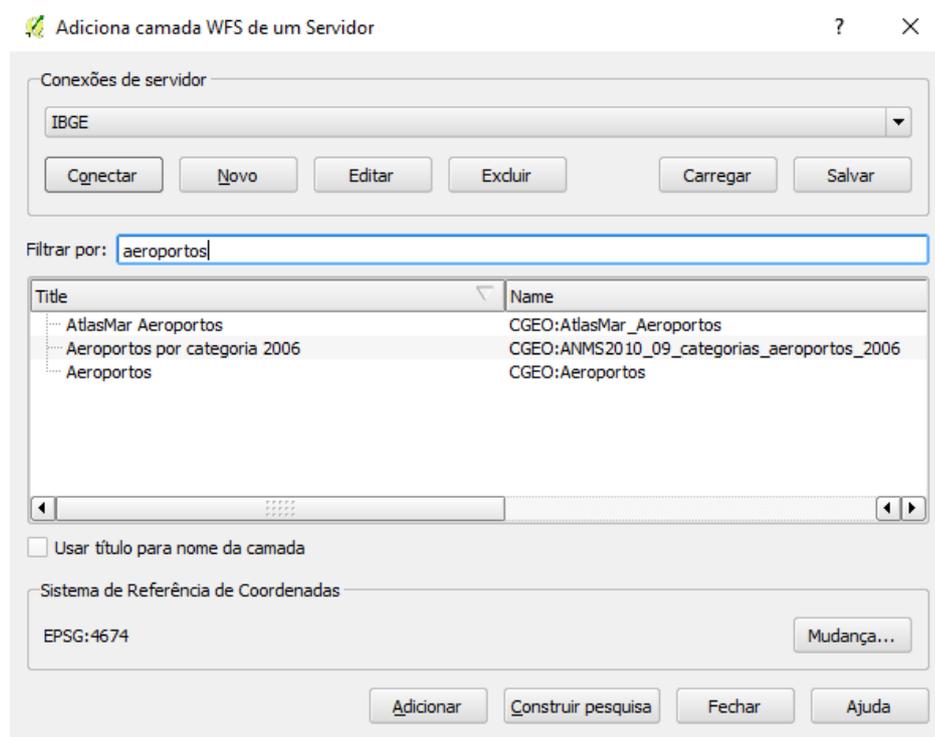
5.1. Operações básicas do QGIS aplicadas em estudos de transporte

5.1.1. Acesso à camadas através de conexão com um servidor

A cidade de Joinville foi objeto deste estudo. Os dados georreferenciados da cidade foram fornecidos pela Prefeitura Municipal de Joinville, entretanto, às vezes é necessário utilizar dados censitários que somente são disponibilizados pelo IBGE.

O QGIS permite adicionar camadas WFS diretamente de um servidor, incluindo o servidor do IBGE. Portanto, é possível ter acesso a dados vetoriais do Brasil diretamente pelo QGIS e filtrar esses dados de acordo com palavras chave. A conexão com o servidor do IBGE permite mapear todos os aeroportos em território nacional diretamente pelo QGIS conforme exposto na figura a seguir:

Figura 5 - Adição de camadas a partir de conexão com um servidor.



Fonte: Autor (2016)

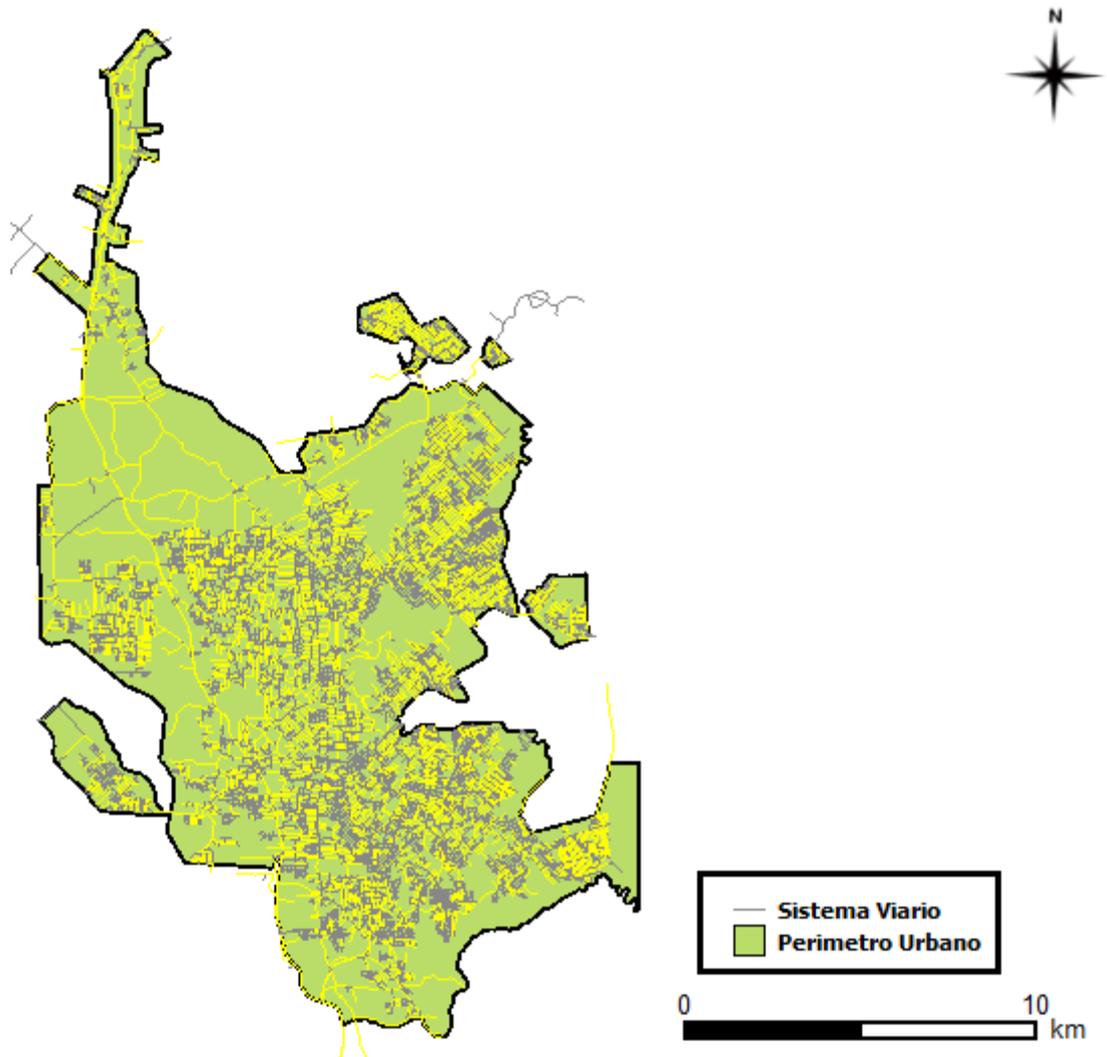
5.1.2. Consulta espacial e condicional

As vias de Joinville estão georreferenciadas de acordo com o sistema de coordenadas SIRGAS 2000, então, a ferramenta permite verificar o comprimento de todo o sistema viário mapeado pela prefeitura de Joinville.

O QGIS faz consultas espaciais e condicionais baseado em valores de atributos e de expressões matemáticas através da ferramenta *selecionar feições usando uma expressão*. Utilizando esse instrumento foi possível selecionar todas as vias de Joinville que possuem uma extensão maior do que 150 m dentro de um intervalo de interseções.

A Figura 6 mostra o resultado da seleção de feições com mais de 150 metros. As feições selecionadas estão em cor amarelo e podem ser visualizadas nas camadas ativas do projeto, assim como na tabela de atributos dessa camada. A opção de filtro pode ser utilizada para que somente as feições selecionadas sejam mostradas.

Figura 6 - Mapa de vias em Joinville com mais de 150 metros entre duas intersecções consecutivas.



Fonte: Autor (2016).

Tabela 5 - Seleção de vias em Joinville com mais de 150 metros entre duas intersecções consecutivas.

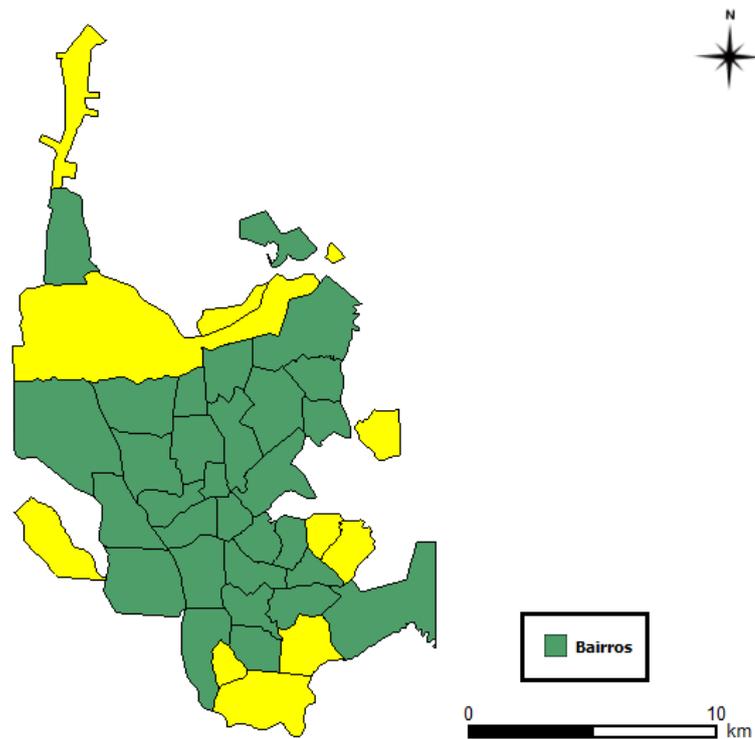
	objectid	shape_leng	nomelog	RELEVO	i	j
0	8957	154.5214260900...	HABIB FARAH	NULL	joi1	joi2
1	8958	153.1504578059...	HABIB FARAH	NULL	joi2	joi3
2	8959	186.2039127959...	REALCY SILVEIRA	NULL	joi4	joi5
3	8960	156.1888046150...	REALCY SILVEIRA	NULL	joi5	joi6
4	8961	152.0825010000...	REALCY SILVEIRA	NULL	joi6	joi7
5	8962	155.0203603960...	REALCY SILVEIRA	NULL	joi7	joi8
6	8963	153.3991230519...	REALCY SILVEIRA	NULL	joi8	joi9
7	8964	151.6818158629...	REALCY SILVEIRA	NULL	joi9	joi10
8	8965	52.51850635440...	PADRE VALENTE ...	NULL	joi11	joi12
9	8966	152.4374003019...	PADRE VALENTE ...	NULL	joi13	joi14
10	8967	135.5360607210...	VALDEMAR MEDE...	NULL	joi15	joi16

Fonte: Autor (2016).

Conforme exposto na Tabela 5, o sistema viário de Joinville possui atributos de identificação, comprimento, nome, relevo, ponto inicial da via e ponto final. Caso houvesse velocidades de operação atribuídas a cada via, seria possível estimar seu tempo médio de viagem utilizando o atributo de comprimento.

Outra possível forma de consulta é a partir de dados censitários. Utilizando dados populacionais de 2010 do IBGE, é possível selecionar todos os bairros de Joinville que possuem população maior do que 10 mil habitantes e renda média por habitante inferior a R\$ 1500,00, conforme exposto na Figura 7. Os bairros que atendem às condições de consulta são os mostrados em amarelo.

Figura 7- Mapa dos bairros de Joinville com população superior a 10000 e renda média inferior a R\$ 1500,00.

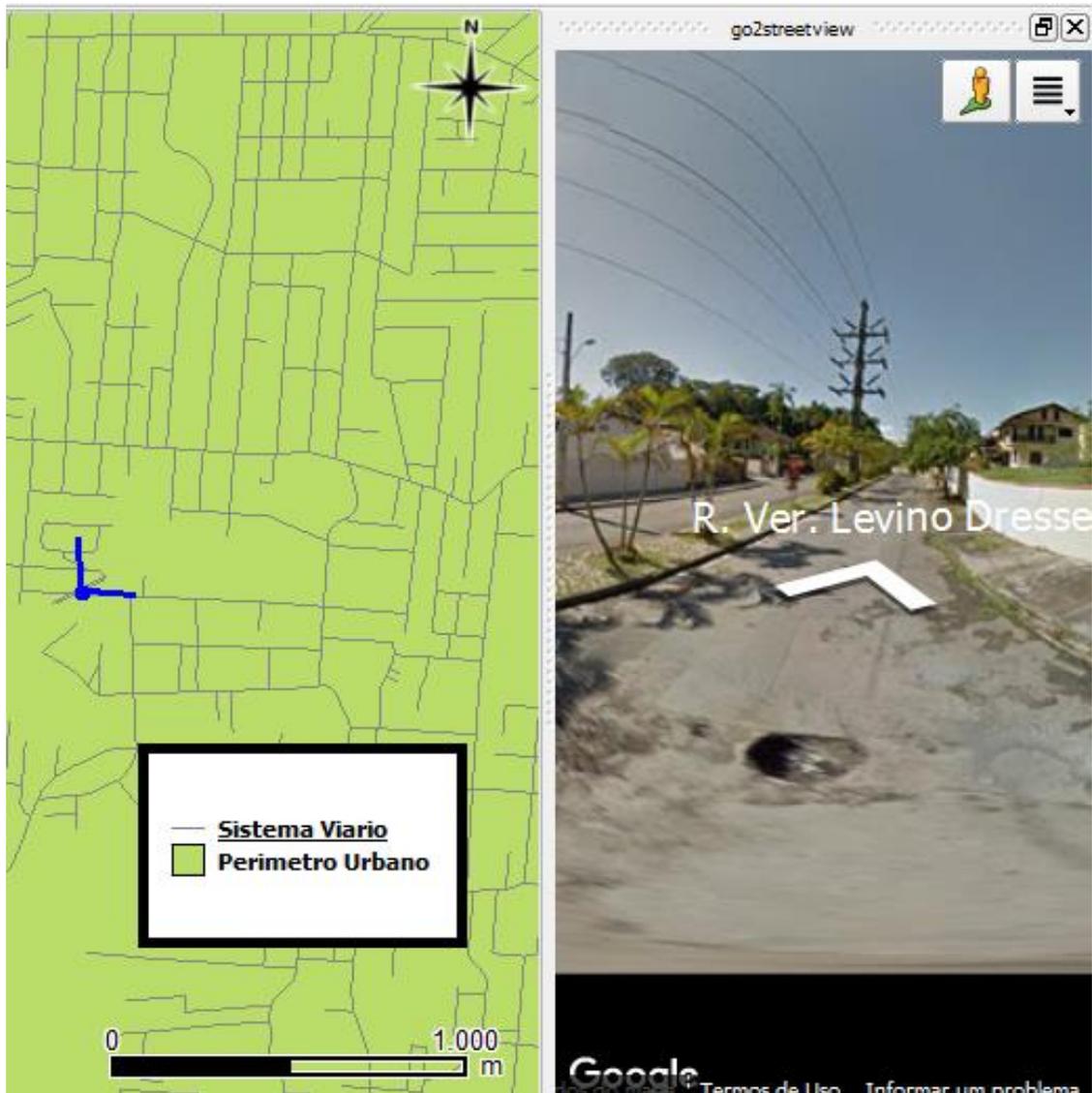


Fonte: Autor (2016).

5.1.3. Coleta de dados e diagnóstico do sistema viário

O complemento go2streetview facilita a coleta de dados e o diagnóstico de um sistema viário. Este complemento permite selecionar um ponto de uma malha viária georreferenciada e fornece as informações do google street view deste ponto. A Figura 8 mostra o funcionamento do go2streetview na intersecção da Rua Ver. Levino Dressel e a Rua dos Bandeirantes em Joinville.

Figura 8 - Funcionamento do go2streetview.



Fonte: Autor (2016).

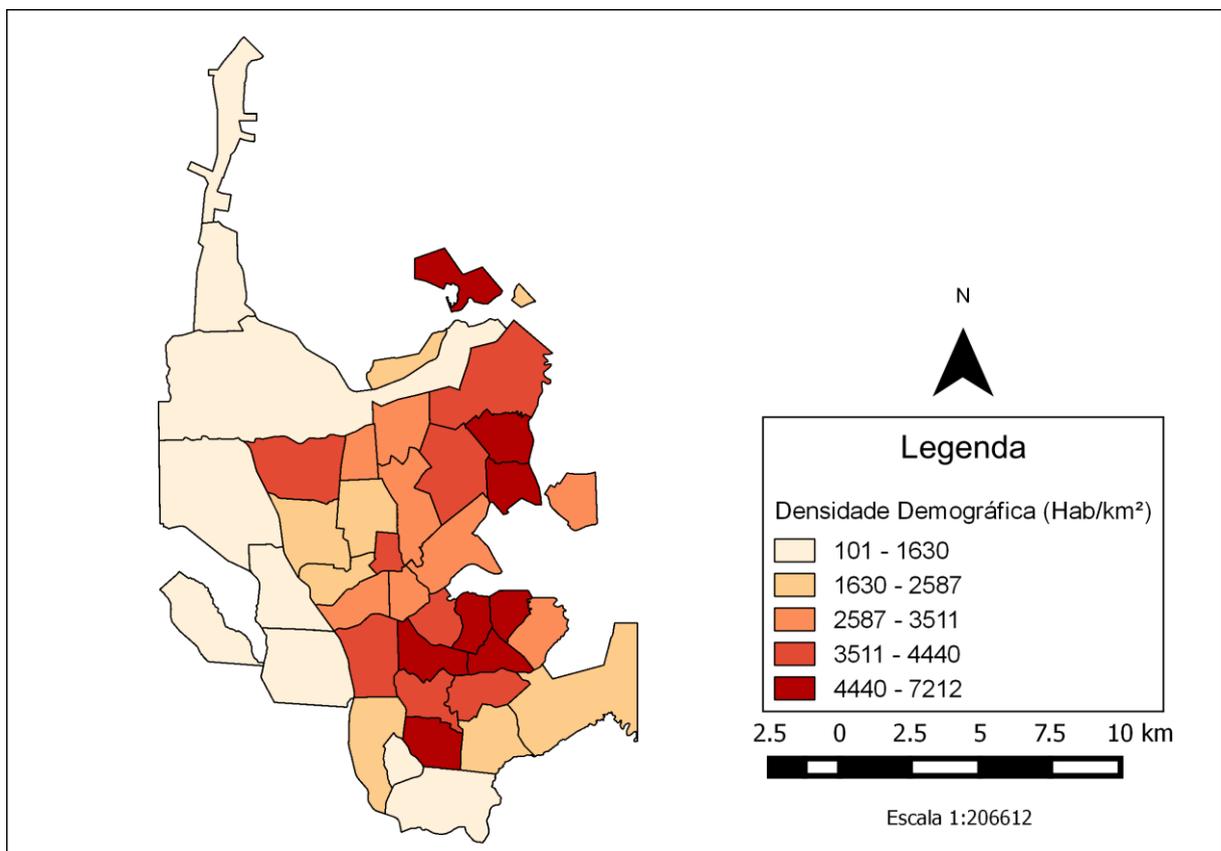
A união das camadas vetoriais no QGIS e as imagens do Google Street View facilitam a coleta e diagnóstico de dados viários sem a necessidade de inspeções presenciais. O marcador azul na Figura 8 mostra o ângulo de visão que corresponde à imagem do Google Street View em relação ao mapa do QGIS.

Através das imagens fornecidas pelo go2streetview é possível coletar os seguintes dados do sistema viário: sentido da via, número de faixas, tipologia do pavimento, eventuais defeitos no pavimento, conversões permitidas, presença ou ausência de estacionamento lateral, presença de canteiro central e verificação de sinalização de trânsito.

5.1.4. Manipulação de atributos

O QGIS possibilita manipular atributos de um vetor para obter atributos inteiramente novos que possuam aplicações no planejamento de transportes. Para exemplificar essa manipulação, cada bairro de Joinville teve seu número de habitantes dividido pela sua respectiva área. A partir disso, foi obtida a densidade demográfica por bairro de Joinville, conforme verificável no mapa temático abaixo.

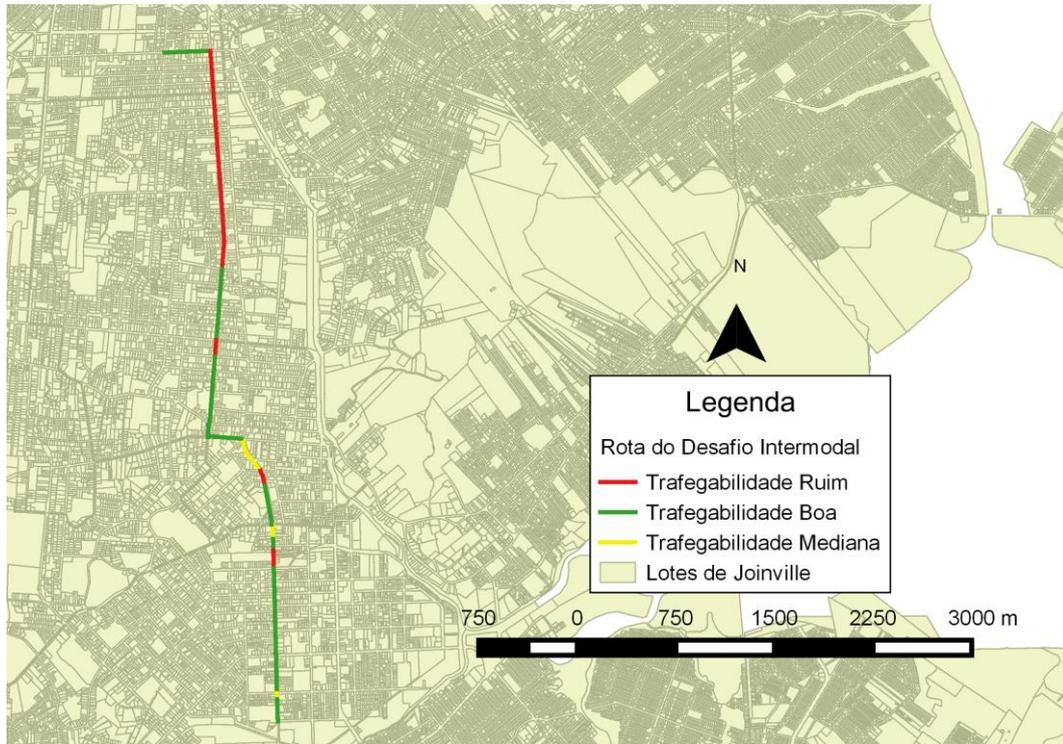
Figura 9 - Mapa da densidade demográfica por bairro de Joinville.



Fonte: Autor (2016).

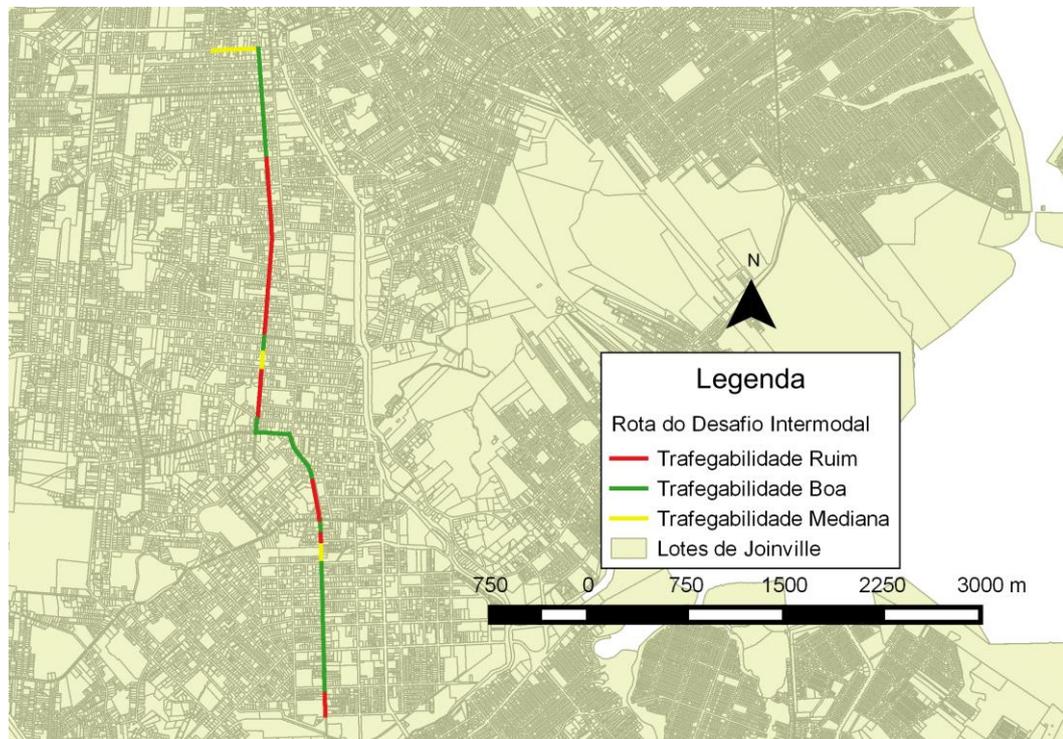
Além de mapas de densidade demográfica, os dados do Desafio Intermodal foram manipulados para elaboração de mapas temáticos referentes à trafegabilidade de 21 segmentos da rota total. O diagnóstico foi feito através dos critérios estabelecidos na seção 4.2.3. Os diagnósticos para as 08:00 horas (Figura 10), 10:00 horas (Figura 11), 16:00 horas (Figura 12) e 18:00 horas (Figura 13) estão dispostos a seguir.

Figura 10 - Diagnóstico da trafegabilidade para a rota do DI (08:00h).



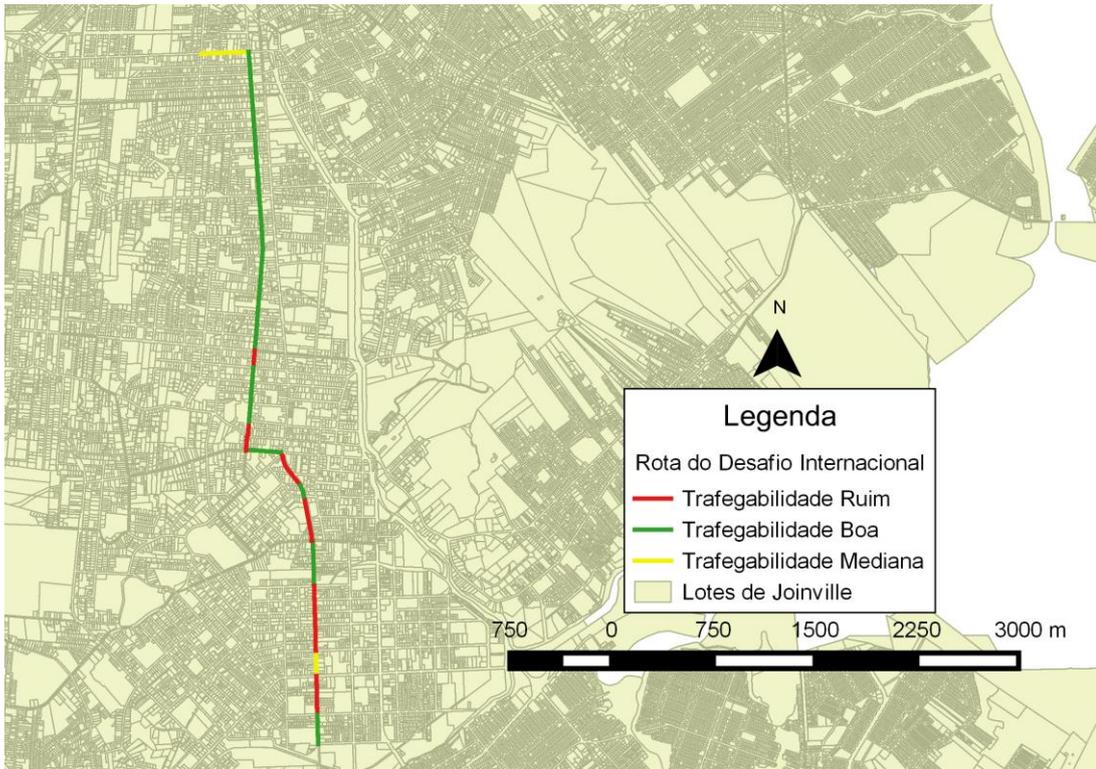
Fonte: Autor (2016).

Figura 11- Diagnóstico da trafegabilidade para a rota do DI (10:00h).



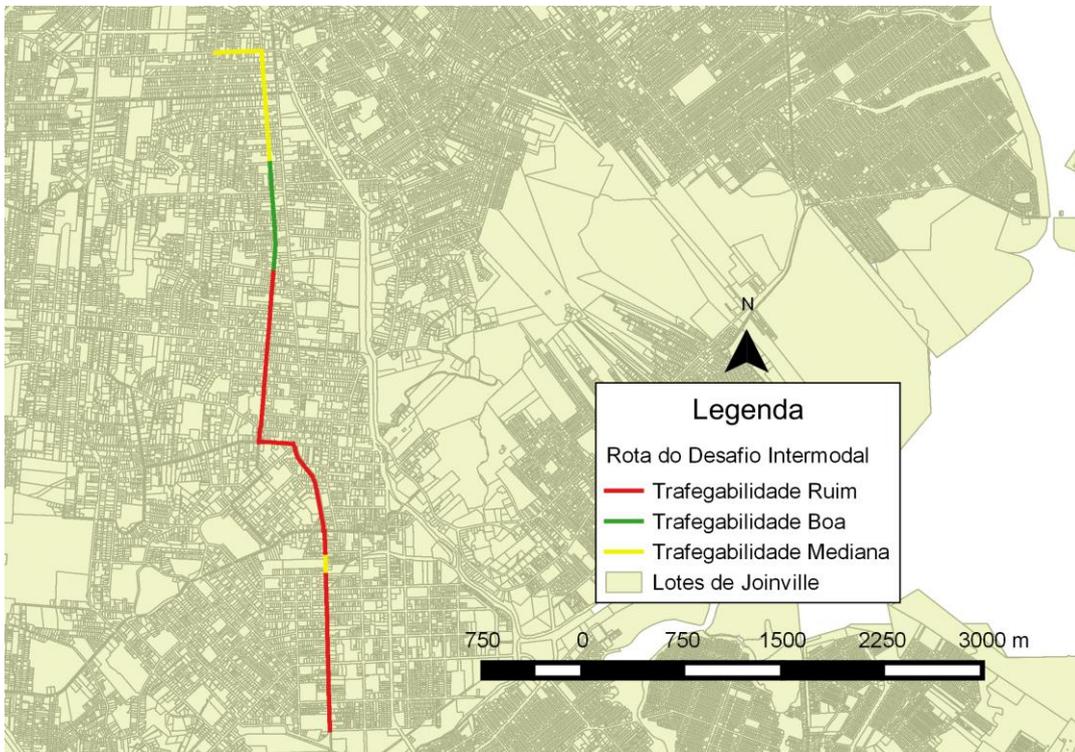
Fonte: Autor (2016).

Figura 12 - Diagnóstico da trafegabilidade para a rota do DI (16:00h).



Fonte: Autor (2016).

Figura 13 - Diagnóstico da trafegabilidade para a rota do DI (18:00h).



Fonte: Autor (2016).

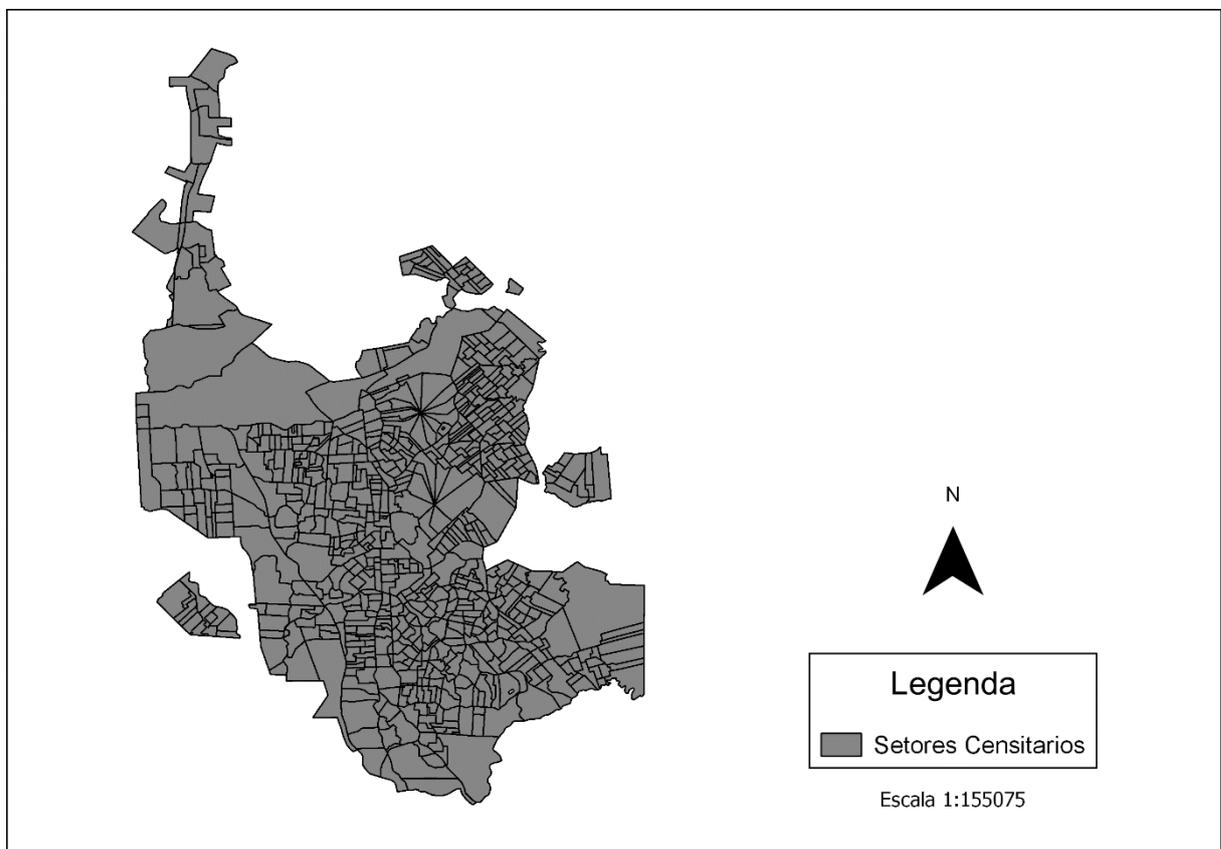
Quase todas as vias contidas na rota do DI possuem sentido único (Norte-Sul). Portanto, uma análise das Figuras 10, 11, 12 e 13 permite inferir que há uma tendência de deslocamentos com o passar do tempo.

No período da manhã, nota-se que há pior trafegabilidade (que pode ser causado por congestionamentos) no sentido Norte-Centro de Joinville, indicando que provavelmente a região central concentra mais empregos ou atividades no geral. Enquanto no período da tarde o congestionamento aumenta no sentido Centro-Sul, indicando que possivelmente a região Sul tem um caráter mais residencial, que é a região para onde as pessoas se deslocam ao fim das atividades diárias.

5.1.5. Indicador da acessibilidade espacial do transporte público urbano

Para o cálculo do indicador da acessibilidade espacial do transporte público urbano em Joinville, a camada contendo os setores censitários urbanos da cidade de Joinville (736 setores) foi utilizada (Figura 14).

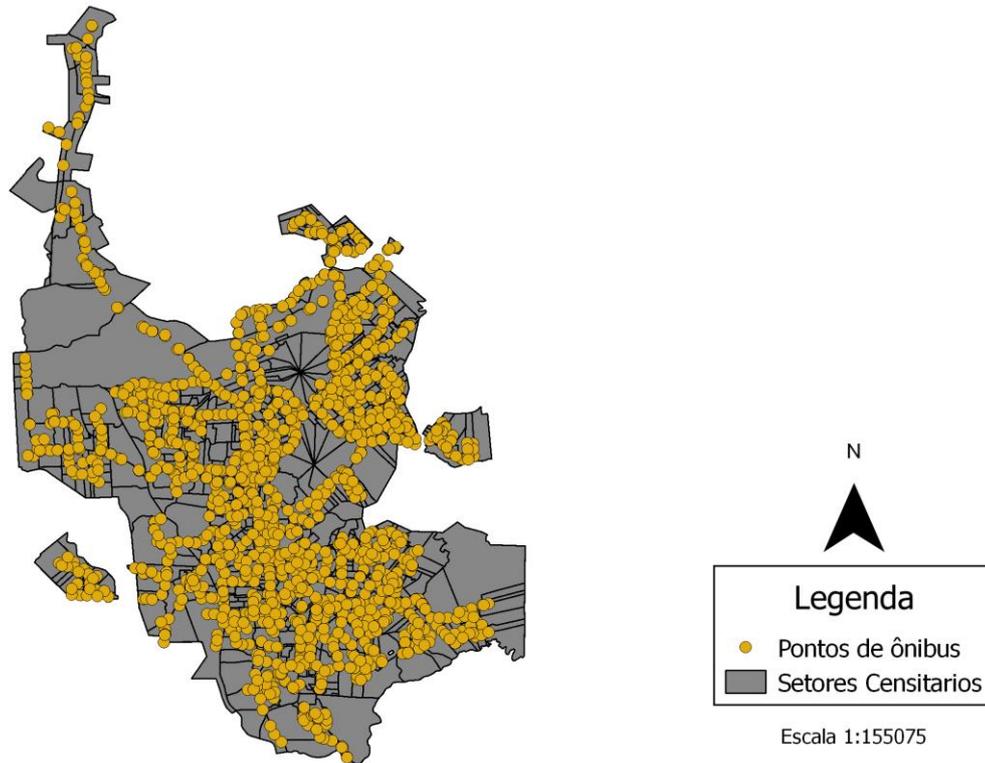
Figura 14 - Mapa dos setores censitários urbanos do IBGE em Joinville.



Fonte: Autor (2016).

Em seguida, os pontos de ônibus da cidade (1648) foram georreferenciados, (Figura 15):

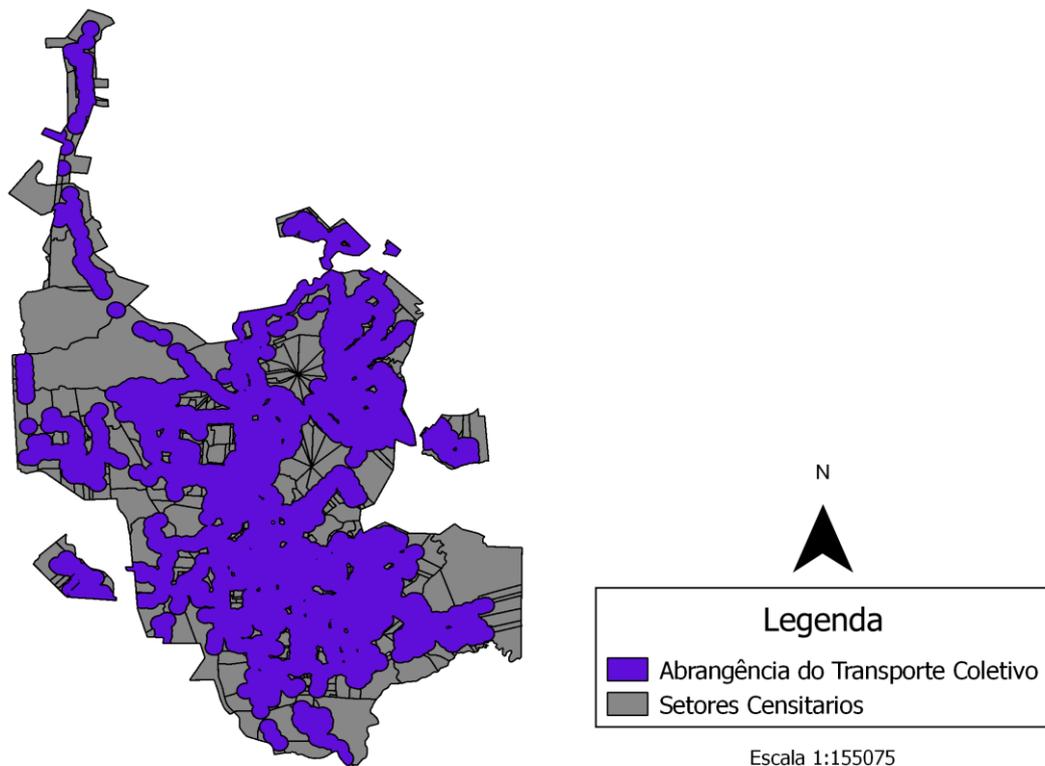
Figura 15 - Mapa dos pontos de ônibus do perímetro urbano de Joinville.



Fonte: Autor (2016).

Com o uso do complemento MMQGIS foi feita uma zona de abrangência (buffer) de 300 metros para os pontos. Para Ferraz e Torres (2004), esta distância de deslocamento é ideal para o usuário de transporte coletivo. As zonas de abrangência foram dissolvidas em um único polígono para que se delimitasse a área de intersecção entre a abrangência do transporte coletivo e a dos setores censitários. A Figura 16 mostra o mapeamento das zonas de abrangência.

Figura 16 - Mapa de acessibilidade espacial ao transporte público urbano de Joinville.



Fonte: Autor (2016).

A interseção entre a área de abrangência do transporte coletivo e a dos setores censitários demonstrou que um total de 409.738 habitantes é atendido pelo transporte público dentro de uma distância de 300 metros. Tendo em mente que a população urbana de Joinville é de 497.850 habitantes (IBGE, 2010), é possível inferir que 18% da população urbana não tem suas necessidades atendidas pelo transporte coletivo no município.

A Equação 3 da Seção 4.4.5. foi utilizada para o cálculo do indicador, que apresentou um valor de 0,823. Segundo a Tabela 3, isso significa que Joinville possui uma boa distribuição espacial dos pontos de embarque e desembarque do transporte público urbano.

5.2 Análise de caminho mínimo

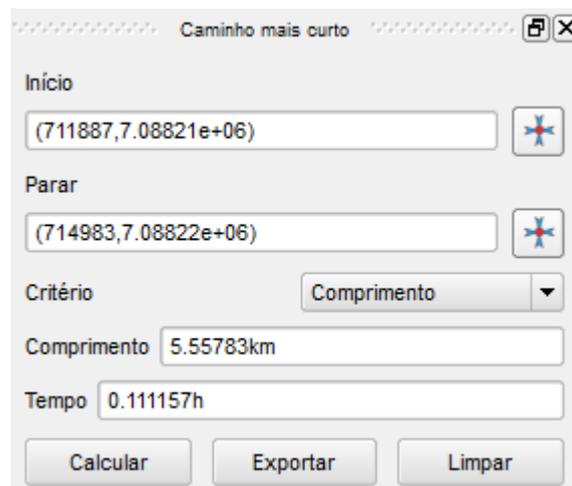
O QGIS calcula o caminho mais curto entre dois pontos em uma camada de linhas e exporta o caminho à rede viária, o algoritmo para cálculo é um módulo complementar em C++. Para que o complemento gere uma rota, é necessário informar um ponto de origem e de destino, os pontos podem ser inseridos por seleção no mapa ou pelas coordenadas.

Além disso, é necessário informar um campo de atributos para cada arco do sistema viário que indique quais os sentidos de tráfego permitidos e quais são suas velocidades de operação.

O percurso gerado é adequado a uma rede viária (linhas), portanto, não é considerada apenas a distância euclidiana entre os dois pontos. O usuário deve definir se o critério da geração da menor rota será baseado no comprimento ou no tempo de viagem, que devem ser valores constantes, isso significa que o complemento não considera efeitos de congestionamento.

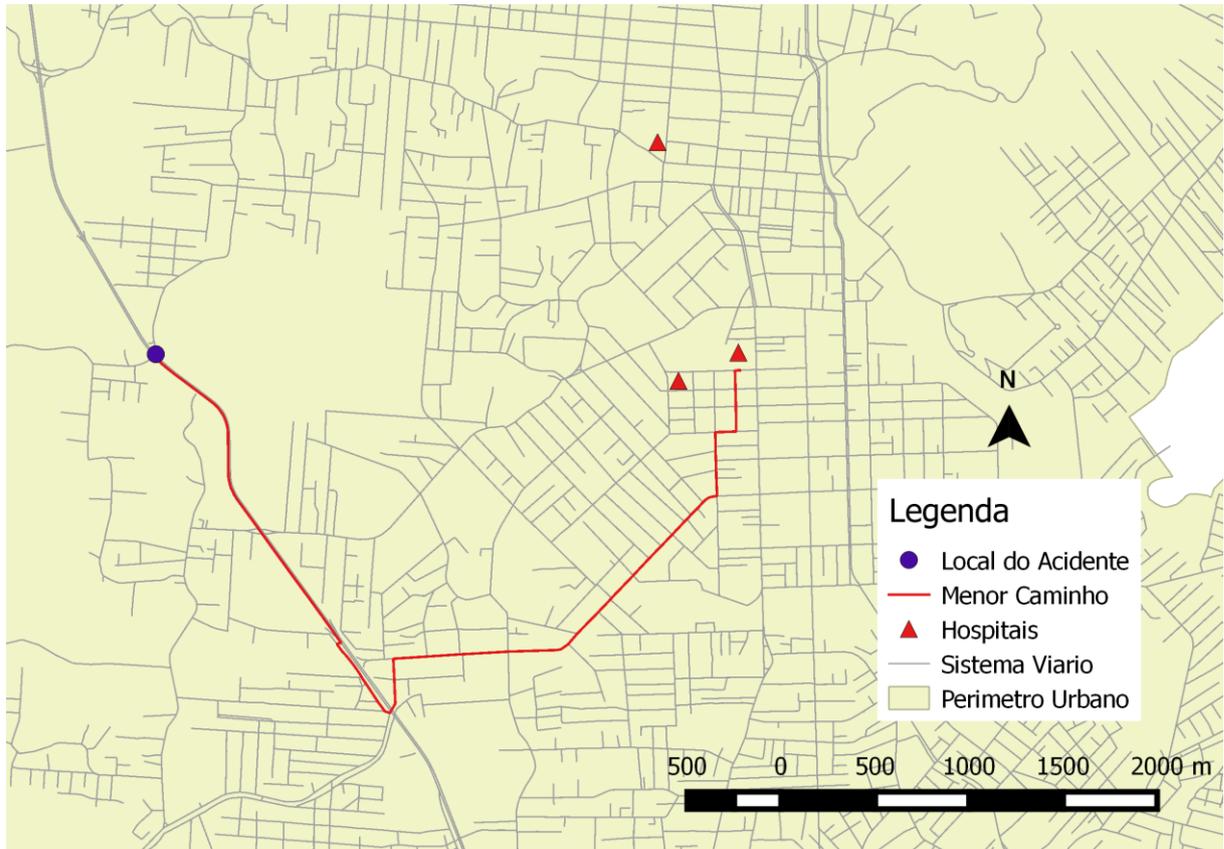
As Figuras 17 e 18 mostram a interface e os resultados do complemento. Para amostragem de pontos foi escolhido como ponto de origem, o local de um acidente de trânsito na rua Colon e como destino, o Hospital Municipal São José.

Figura 17- Interface do complemento de caminho mais curto.



Fonte: Autor (2016).

Figura 18 - Menor caminho gerado.



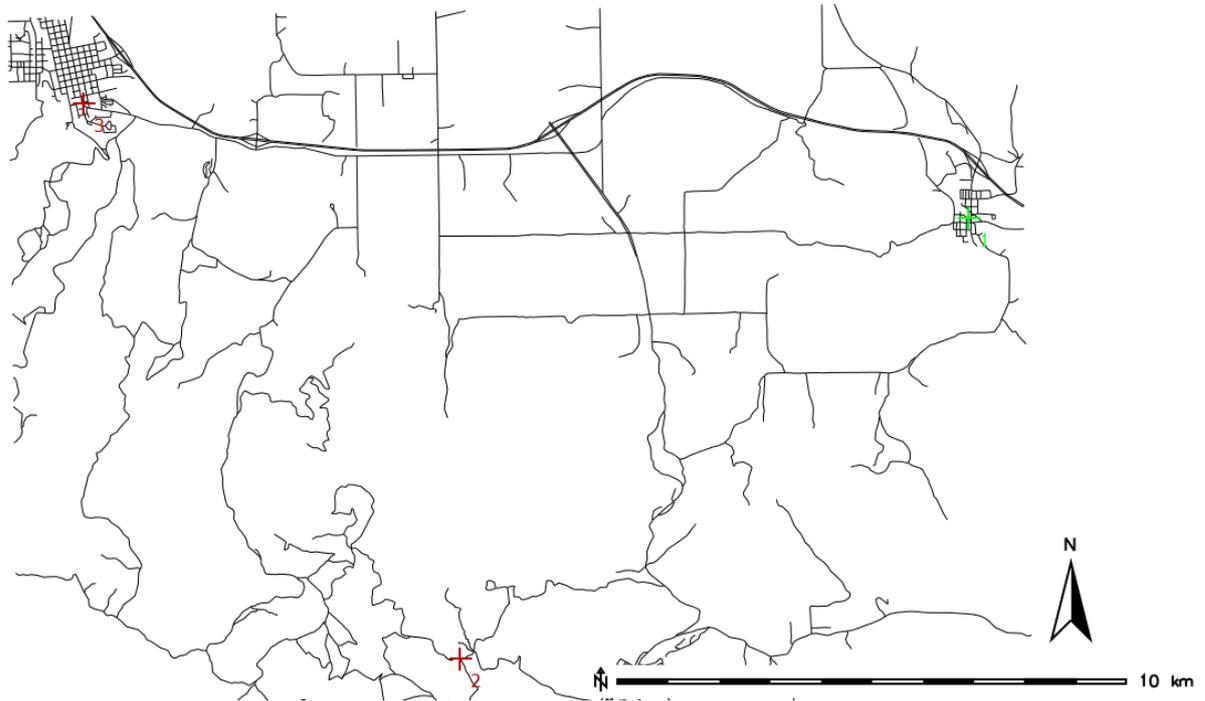
Fonte: Autor (2016).

A Figura 18 mostra o traçado do menor caminho no mapa, sendo possível extrair a rota em um novo arquivo shape de linhas. Além disso, na Figura 17 é verificável que o complemento informa a distância total percorrida na rota (5.55783 km) e o tempo total do deslocamento (0.111157 h). A velocidade utilizada para o cálculo do tempo é constante durante todo o trajeto, neste exemplo, foi considerada uma velocidade média de 50 km/h.

5.3 Problemas de roteirização

Neste estudo, o problema de roteirização foi o do caixeiro viajante e para a resolução do problema foi utilizada a rede viária de Spearfish e a ferramenta GRASS GIS. Foram vinculados aleatoriamente à rede três pontos que devem ser atendidos, conforme a Figura 19. Os pontos a serem atendidos estão marcados em vermelho, sendo que o ponto de origem do ciclo está marcado em verde.

Figura 19 - Pontos a seres atendidos na rede de Spearfish.

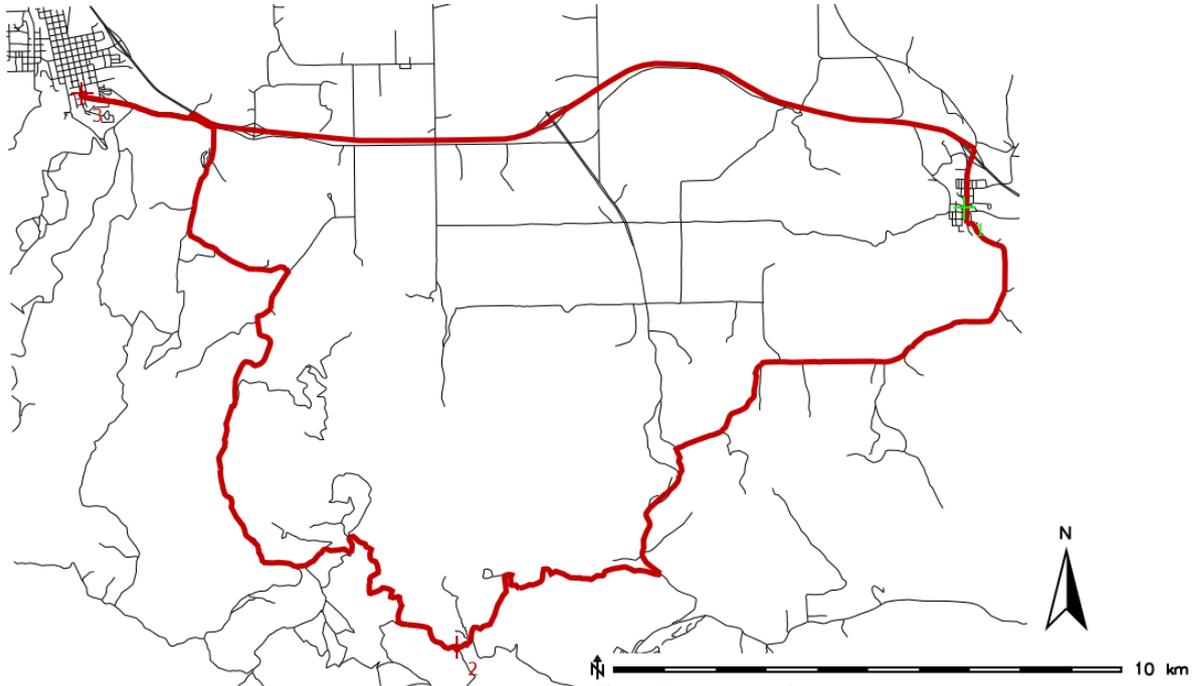


Fonte: Autor (2016).

Em seguida foi aplicada a rotina *v.net.salesman* da ferramenta de análise de redes vetoriais nos pontos marcados e encontrou-se o resultado para o problema do caixeiro viajante. Essa rotina mostra o ciclo a ser percorrido no mapa e gera um relatório de quantos nós (encontro entre dois ou mais arcos) e quantos arcos são percorridos pelo ciclo.

Para atender os pontos desse exemplo foram percorridos 90 nós e 97 arcos, caso os dados de comprimento de cada arco tivessem sido vinculado à rede de Spearfish, teria sido possível quantificar a distância total percorrida no ciclo. Para a rotina foram consideradas apenas as distâncias dentro da escala gráfica da rede. A Figura 20 mostra o resultado do ciclo hamiltoniano para o problema.

Figura 20 - Resultado para o problema do caixeiro viajante.



Fonte: Autor (2016).

Além do problema do caixeiro viajante, o GRASS GIS disponibiliza outras ferramentas de análise em redes de vetores, como: análises de caminho mínimo, determinação de fluxo máximo entre um ponto de origem e um de destino em arcos com capacidade definida, definição de subredes para os centros mais próximos, entre outros problemas de teoria de grafos. Esses problemas não serão abordados neste estudo.

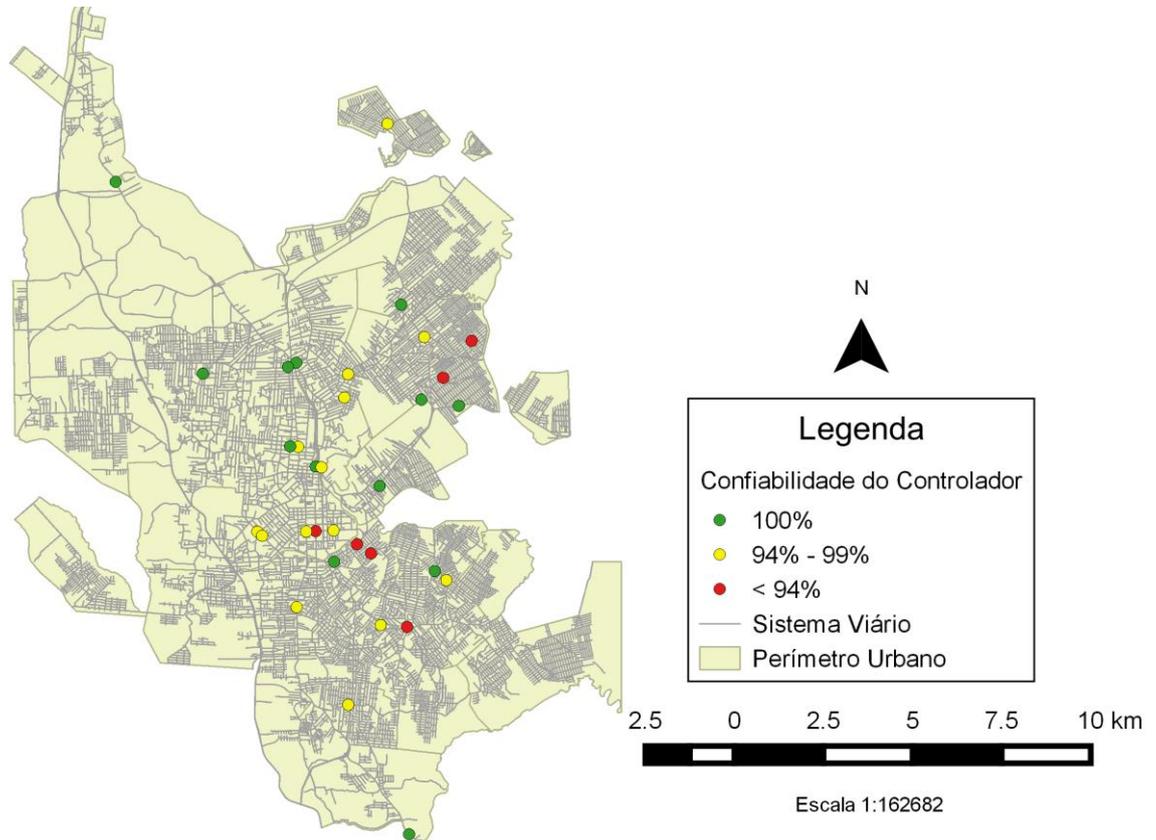
5.4 Problema de clusterização

Para aplicação do problema de clusterização foram utilizados dados de fluxos veiculares extraídos dos controladores de tráfego de Joinville. Inicialmente, marcaram-se os aparelhos com base em seus endereços e avaliou-se sua confiabilidade, essa confiabilidade foi quantificada de acordo com os intervalos de tempo em que cada controlador forneceu medições válidas.

A Seção 4.2.1. descreve a medição de cada controlador, há intervalos de tempo em que nenhuma medição foi registrada por falha do aparelho ou por causa de operações de manutenção. A média da confiabilidade por controlador foi calculada a partir do tempo total em que houve registro volumétrico de veículos. A

Figura 21 indica a localização georreferenciada dos controladores e o nível de confiabilidade de cada um. A média de confiabilidade dos aparelhos encontrada foi de 94%.

Figura 21 - Mapa de confiabilidade dos controladores de tráfego de Joinville.



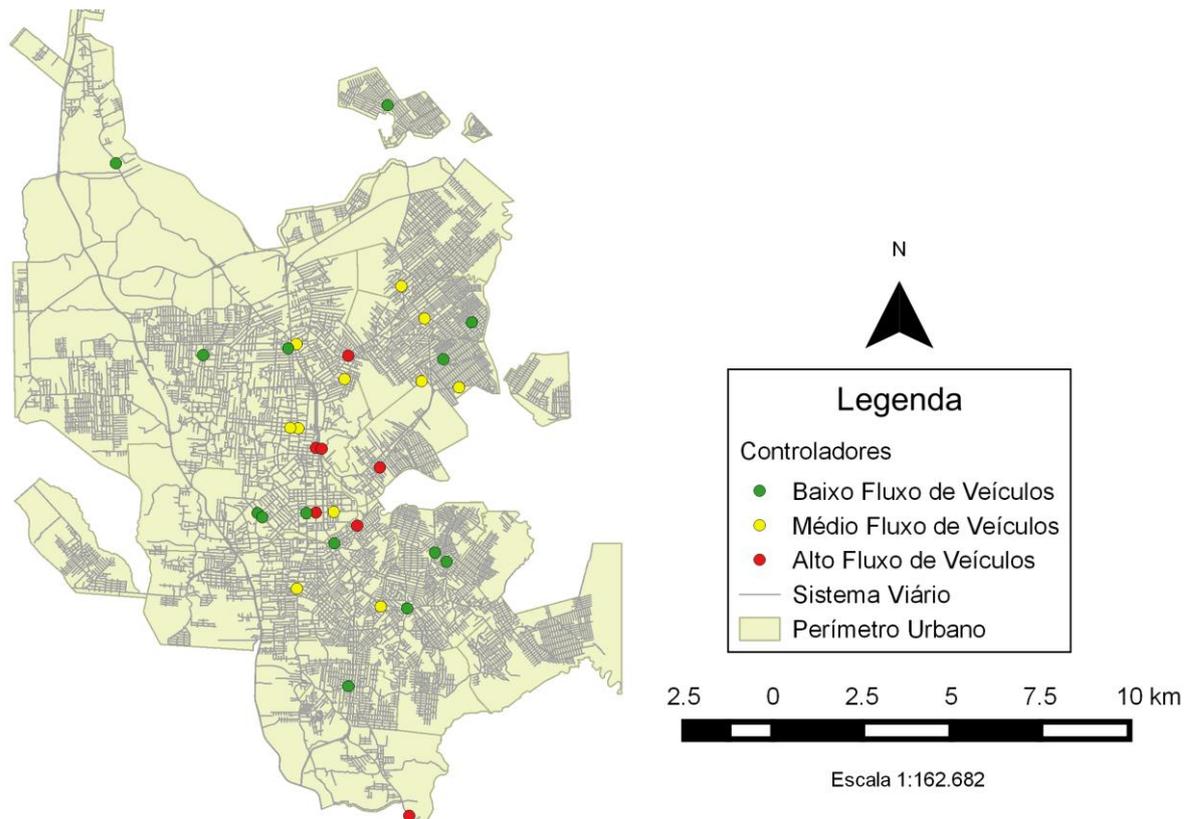
Fonte: Autor (2016).

O QGIS permite a criação de clusters baseado em atributos a partir de uma camada vetorial. Para o caso dos controladores, optou-se por gerar três clusters que agrupassem os aparelhos de acordo com fluxo médio de veículos medido na hora pico (das 18h até as 19h), fluxo médio de veículos ao longo do dia e por sua confiabilidade.

O primeiro agrupamento resultou em apenas um aparelho fazendo parte de um dos clusters e todos os demais divididos em dois outros grupos. Verificou-se então, que o aparelho que foi agrupado sozinho não aferiu nenhuma medição durante todo o período de coleta de dados, portanto, excluiu-se esse controlador do conjunto de pontos e repetiu-se o procedimento de clusterização.

Foram atribuídos os mesmos pesos para todos os atributos dos controladores e como resultado os pontos foram agrupados de acordo com suas características de fluxo. Os clusters formados podem ser divididos nas seguintes categorias: ponto de baixo fluxo de veículos, ponto de médio fluxo de veículos e ponto de alto fluxo de veículos. O mapa abaixo mostra os clusters de fluxo gerados.

Figura 22 - Nível de fluxo de veículos medido pelos controladores de Joinville.



Fonte: Autor (2016).

O resultado dos clusters indica que existe um maior fluxo de veículos nas regiões centrais de Joinville, enquanto nas regiões periféricas, existe uma redução do volume de veículos trafegados na hora de pico e ao longo da semana.

O único ponto que difere desse padrão espacial de fluxos é o ponto na Rua Waldomiro José Borges 6528, localizado no extremo sul de Joinville. O mapa de fluxo permite verificar padrões de deslocamento e a partir dele é possível investigar quais características regionais influenciam o fluxo de veículos.

Idealmente, os dados de fluxo seriam combinados com a velocidade por veículo registrada no momento da contagem, para que se pudesse avaliar também o

efeito do congestionamento, entretanto, os dados de velocidades não foram registrados nas contagens. O fluxo de veículos sozinho não é suficiente para avaliar, por exemplo, o grau de saturação de um sistema de transportes.

Análises de *clusters* comumente são utilizadas para identificação de padrões de tráfego, conforme Erman, Arlitt e Mahanti (2006). O QGIS permite análises não só de clusters espaciais, mas também de clusters baseados em atributos, conforme evidenciado nesta Seção. O método para determinação de clusters utilizado é o de k-médias, onde para cada atributo podem ser atribuídos pesos diferentes.

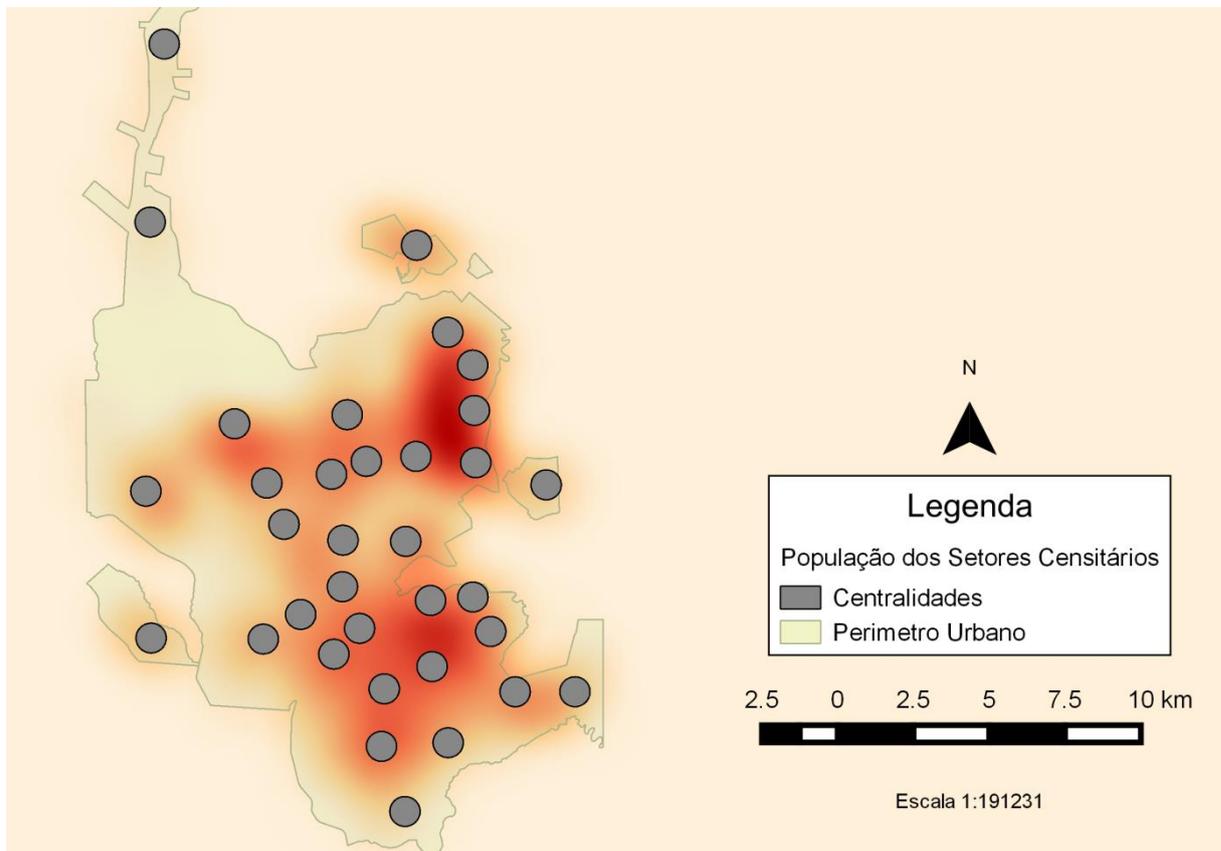
5.5 Modelos de previsão de demanda aplicados

Esta seção descreve modelos de previsão de demanda aplicados em Joinville e em Sioux Falls. O modelo escolhido foi o de 4 etapas, entretanto, apenas as etapas de geração e alocação de viagens foram aplicadas. Atualmente, não há ferramentas SIG livres *open source* que possuam rotinas funcionando corretamente para as etapas de distribuição de viagens e escolha modal.

5.5.1. Geração de Viagens em Joinville

A Seção 4.2.2. descreve a amostragem da pesquisa OD que foi utilizada para o estudo de geração de viagens neste trabalho. A Figura 4 mostra que nem todo o perímetro urbano da cidade foi coberto pelas centralidades escolhidas para a amostra da pesquisa. Os setores censitários de 2010 do IBGE foram mapeados e interseccionados com a área das centralidades, em seguida foi gerado um mapa de calor para a população total desses setores conforme a Figura 23.

Figura 23 - Mapa de calor da população dos setores censitários x centralidades da pesquisa OD de Joinville.



Fonte: Autor (2016).

O mapa acima exibe em tom vermelho escuro as regiões em que existe maior concentração de habitantes, isso evidencia que a amostragem da pesquisa OD por meio das centralidades acaba excluindo vários habitantes dos setores censitários, principalmente, na zona Leste de Joinville.

As respostas da pesquisa OD informavam o bairro de origem e o bairro de destino para cada deslocamento, portanto, somente a amostra das centralidades não pode ser considerada para o equacionamento da geração de viagens. Por causa da amostragem feita na pesquisa OD de 2010 não é possível extrapolar, com confiabilidade, o comportamento dos deslocamentos utilizando como base a população total de cada bairro.

Como a amostragem feita na pesquisa OD não permite uma extrapolação confiável de dados para todo o universo de Joinville, não foi feita uma expansão criteriosa da pesquisa OD. A expansão do número total de viagens foi realizada considerando o número total de entrevistados e a população total por bairro de

Joinville conforme o censo de 2010 do IBGE, embora uma expansão mais adequada devesse considerar o número de entrevistados em cada setor censitário e a população total de cada setor.

Para obtenção de uma equação que explicasse as viagens geradas em Joinville foram utilizados os seguintes dados do ano de 2010: número de viagens da Pesquisa OD, número populacional, renda média por habitante e número de empregos por zona de tráfego.

As zonas de tráfego escolhidas foram os limites de cada bairro da cidade. Em seguida foi aplicada a técnica de regressão linear múltipla considerando o número de viagens produzidas pelo bairro como variável dependente e depois utilizando o número de viagens atraídas como variável dependente.

Os números de viagens e de empregos foram extrapolados para a população total de Joinville em 2010 para possibilitar o equacionamento. As regressões lineares múltiplas foram feitas com o auxílio da ferramenta SIG GeoDa e forneceram os seguintes resultados para cada um dos casos:

Tabela 6 - Geração de viagens por bairro de Joinville.

	R ²	Variável	Coefficiente	Desvio Padrão
PRODUÇÃO DE VIAGENS	0,735544	Constante	1120,28	2320,17
		População	0,551411	0,119899
		Renda	-0,655782	0,812547
		Número de Empregos	1,31707	0,183941
ATRAÇÃO DE VIAGENS	0,740878	Constante	1113	2306,21
		População	0,548761	0,119177
		Renda	-0,679062	0,807659
		Número de Empregos	1,333358	0,182834

Fonte: Autor (2016).

As variáveis dependentes escolhidas são: número de viagens com origens em cada bairro (viagens produzidas) e número de viagens com destino para cada bairro (viagens atraídas), enquanto as variáveis explicativas são a população do bairro, a renda média por habitante e o número de empregos em cada bairro.

O resultado da regressão linear resultou em coeficientes de determinação (r^2) próximos de 1, o que indica que existe significativa relação entre as variáveis

equacionadas. As equações de produção e atração de viagens em Joinville podem ser expressas como:

$$P_i = 0,5514POP_i - 0,6558R_i + 1,3171E_i + 1120,28$$

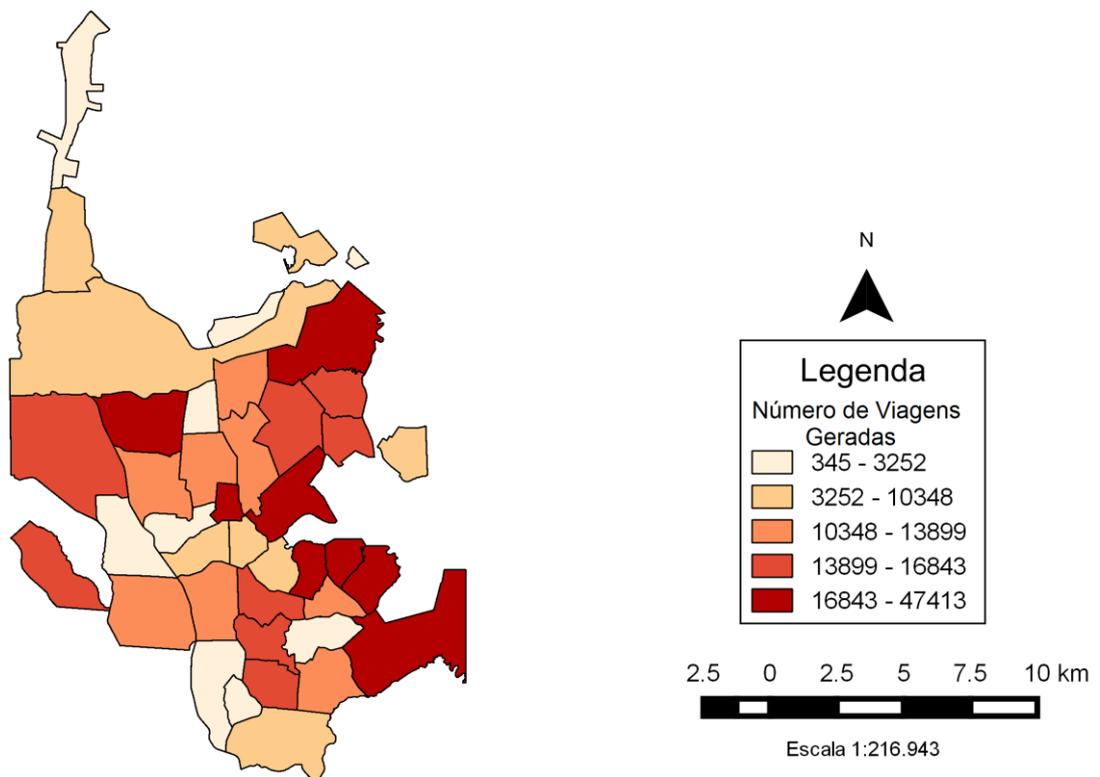
$$A_i = 0,5488POP_i - 0,6791R_i + 1,3333E_i + 1113$$

Onde:

- P_i = produção de viagens no bairro i ;
- A_i = atração de viagens no bairro i ;
- POP_i = população do bairro i ;
- R_i = renda do bairro i ;
- E_i = número de empregos no bairro i ;

O resultado do número de viagens gerado por cada bairro permitiu a elaboração do mapa a seguir, que sintetiza a produção e atração de viagens por bairro para o caso de Joinville.

Figura 24 - Mapa da geração de viagens por bairro de Joinville.



Fonte: Autor (2016).

Nessa análise, foram considerados 41 bairros de Joinville, sendo que a cidade tem 43 no total. A Zona Industrial Tupy e o bairro Dona Francisca foram excluídos da análise porque não foram citados na pesquisa OD, portanto, a sua inclusão tornaria os resultados menos confiáveis.

Os resultados encontrados para a geração de viagens por bairro de Joinville não apresentam confiabilidade suficiente, a amostragem feita para a Pesquisa OD (escolha das centralidades) foi o principal limitante para qualidade dos resultados.

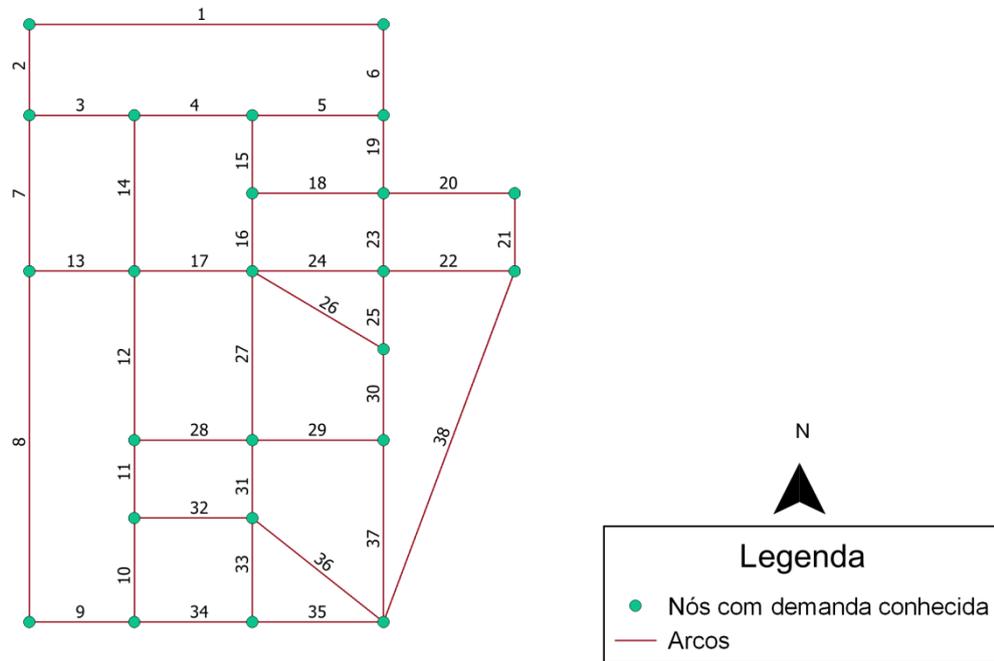
Caso todos os setores do IBGE tivessem sido incluídos na amostra, teria sido possível extrapolar os dados para todo o universo de Joinville de forma mais acertada. Isso evidencia como ferramentas SIG podem ser utilizadas desde fases iniciais do planejamento de transportes, como a coleta de dados.

A geração de viagens foi aplicada neste trabalho somente para comprovar as capacidades de um SIG *open source* livre em problemas de análise de demanda por transporte.

5.5.2. Alocação de viagens na rede de Sioux Falls

Para o problema de alocação de viagens foi utilizada a rede viária de Sioux Falls descrita na seção 4.2.2. Os vértices e arcos da rede foram replicados para ambiente SIG, no entanto, não são condizentes com as dimensões reais da cidade de Sioux Falls. A Figura 25 mostra a disposição de vértices e arcos utilizados.

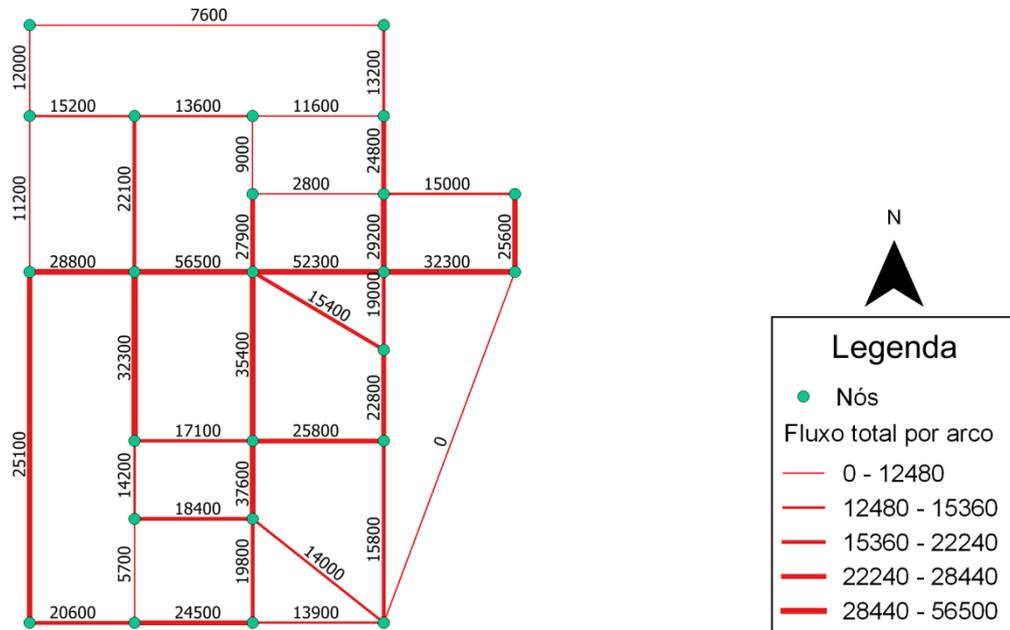
Figura 25 - Rede viária simplificada de Sioux Falls.



Fonte: Autor (2016).

O complemento AequilibraE permite a alocação tudo-ou-nada em redes com nós de demanda conhecida e com tempos de viagens constantes para cada arco. Para o caso de Sioux Falls, os tempos de viagem e as demandas foram extraídos do trabalho de LeBlanc, Morlok e Pierskalla (1975). Os arcos foram considerados bidirecionais com o mesmo tempo de viagem em ambas as direções. A Figura 26 exhibe o resultado da alocação tudo-ou-nada para a rede de Sioux Falls (volume de veículos alocados em cada arco).

Figura 26 - Mapa da alocação tudo-ou-nada para Sioux Falls.



Fonte: Autor (2016).

Para a verificação dos resultados, o problema de alocação tudo-ou-nada foi executado em um algoritmo implementado pelo autor em C++ e os fluxos resultantes para cada arco foram comparados (Tabela 7) com os fluxos da Figura 26. O número de cada arco corresponde com o identificador numérico da Figura 25.

Tabela 7 - Comparativo entre fluxos resultantes do AequilibraE e do algoritmo implementado.

Arco	Fluxo Total (AequilibraE)	Fluxo Total (Algoritmo C++)
1	7600	7600
2	12000	12000
3	15200	20400
4	13600	28200
5	11600	21200
6	13200	13200
7	11200	13600
8	25100	24100
9	20600	21600
10	5700	11400
11	14200	16000
12	32300	31500
13	28800	22600
14	22100	14300
15	9000	14000
16	27900	34100
17	56500	40900
18	2800	1600
19	24800	34400
20	15000	16000
21	25600	26200
22	32300	29500
23	29200	30200
24	52300	56900
25	19000	53400
26	15400	0
27	35400	24800
28	17100	18900
29	25800	36800
30	22800	43800
31	37600	45400
32	18400	16600
33	19800	26000
34	24500	25500
35	13900	8700
36	14000	10600
37	15800	9000
38	0	24200

Fonte: Autor (2016).

O número de viagens para cada arco encontrado pelo AequilibraE não condiz com o do algoritmo para alocação tudo-ou-nada implementado em C++. A rotina de alocação tudo-ou-nada do AequilibraE foi executada mais de uma vez com o objetivo de detectar um motivo para a discrepância nos resultados, entretanto, a causa não pode ser identificada.

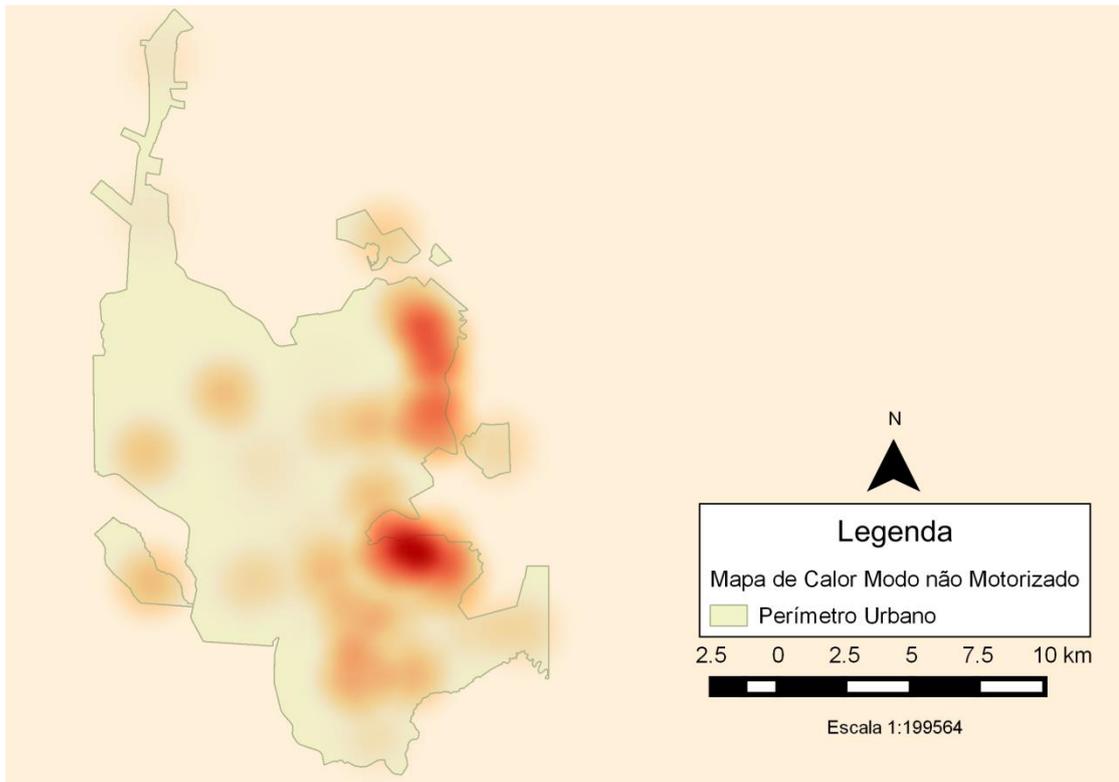
Existe a possibilidade de que o código fonte do AequilibraE não tenha feito a leitura do último arco (número 38), ao qual foi atribuído um fluxo igual a 0. A negligência de um único arco pode causar alterações de fluxo em todos os demais arcos no problema de alocação de viagens.

5.6 Visualização de dados

A visualização dos resultados dos modelos de transporte em ambiente SIG foi suficientemente exposta neste trabalho em forma de grafos de mobilidade, redes e trajetórias mapeadas, entre outros. Como complemento às capacidades de visualização para problemas de transporte foram gerados mapas de calor da cidade de Joinville referentes às modalidades de transporte utilizadas.

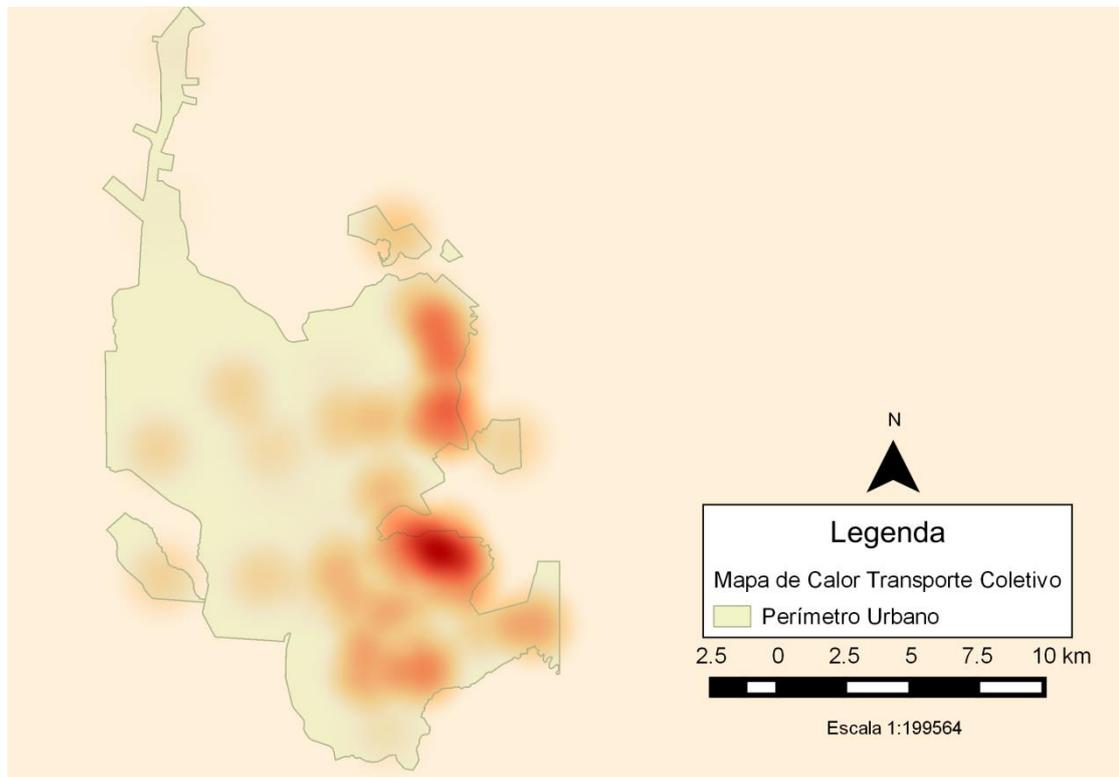
Os dados da Pesquisa OD de Joinville foram utilizados para quantificar o uso por modo de transporte relativo à cada centralidade, os modos analisados nas respostas da Pesquisa OD são: modo não motorizado, transporte coletivo urbano e transporte individual. Os resultados estão expostos nas Figuras 27, 28 e 29.

Figura 27- Mapa de calor do uso de modo de transporte não motorizado por centralidade de Joinville.



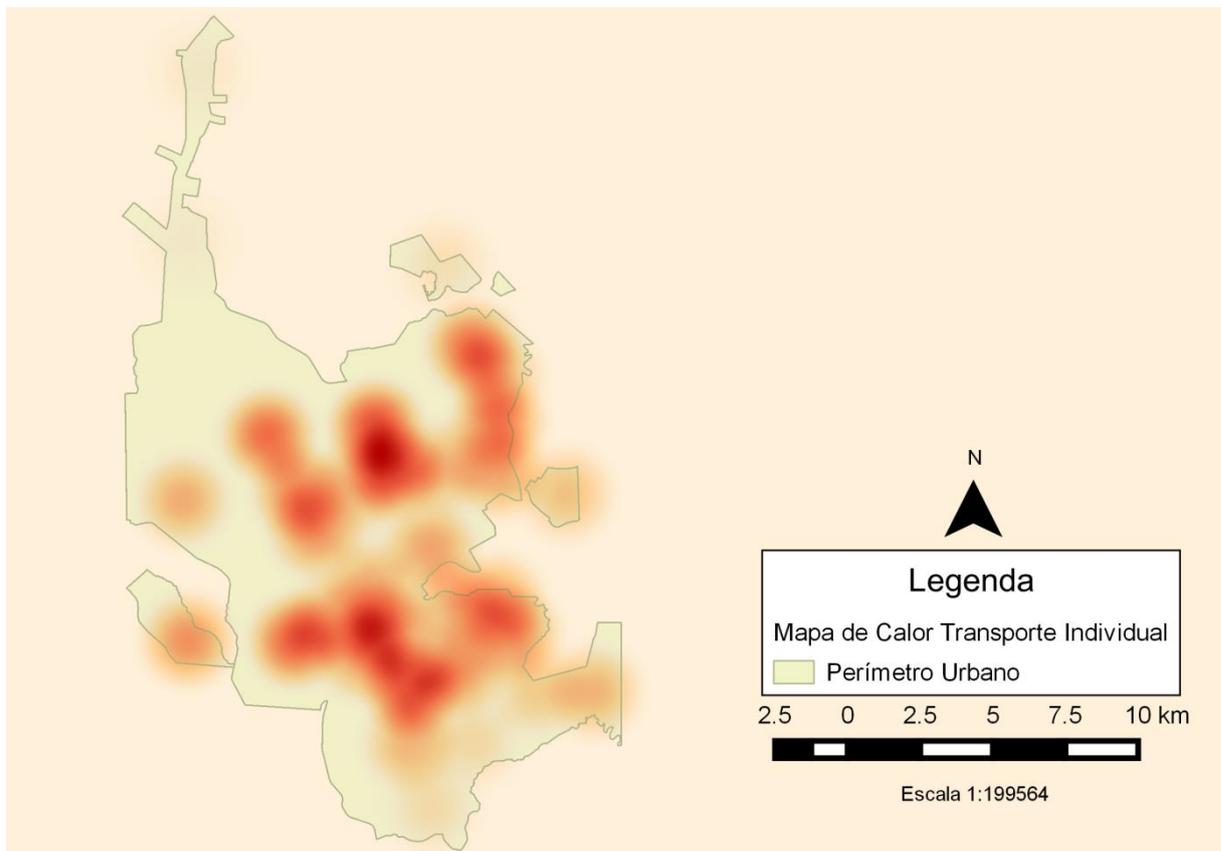
Fonte: Autor (2016)

Figura 28- Mapa de calor do uso de transporte coletivo por centralidade de Joinville.



Fonte: Autor (2016).

Figura 29 - Mapa de calor do uso de transporte individual por centralidade de Joinville.

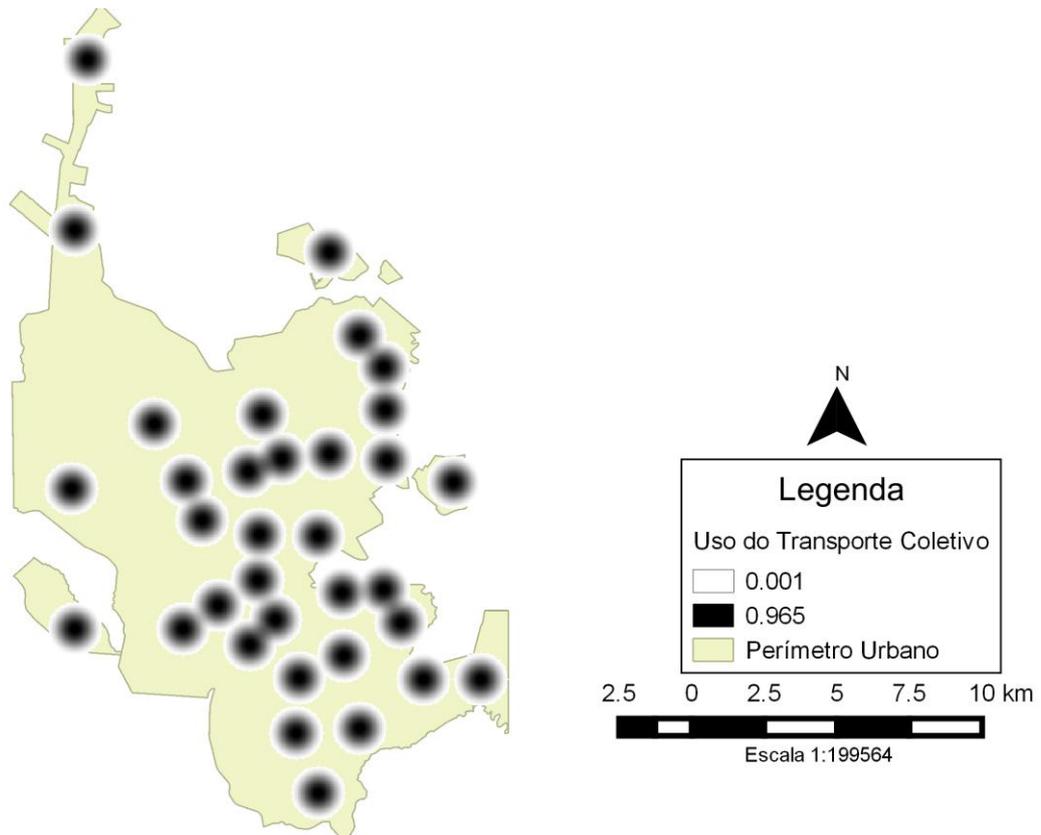


Fonte: Autor (2016).

Os mapas de calor indicam que há maior utilização de modos não motorizados e do transporte público na região Leste de Joinville, enquanto o uso do transporte individual é superior e está mais bem distribuído pelas centralidades da Pesquisa OD.

O QGIS permite a rasterização de mapas de calor. A rasterização é feita através da avaliação dos atributos no mapa de calor, o de valor máximo recebe um pixel de cor preta e o menor valor recebe a cor branca, os demais atributos são pixelados de acordo com os valores máximos e mínimos. A Figura 30 mostra o resultado da rasterização do mapa de calor da Figura 28.

Figura 30 - Rasterização da Figura 28.



Fonte: Autor (2016).

5.7 Síntese dos resultados

Para sintetizar os resultados encontrados e atingir o objetivo geral proposto, as ferramentas desejáveis em um SIG-T aplicadas por meio dos SIG estudados, foram classificadas em quatro categorias qualitativas: bom, médio, ruim ou inexplorado (Tabela 8). Os critérios utilizados para a classificação foram: a presença da ferramenta, a sua aplicabilidade e a qualidade obtida nos resultados.

Problemas de caminho mínimo, roteirização e localização de centros não foram explorados no SIG GeoDa por terem sido detectados no QGIS ou GRASS GIS. A tarefa de localização de centros não foi encontrada no QGIS nem mesmo em complementos não oficiais.

Tabela 8 – Avaliação dos SIG estudados.

Tarefa/Ferramenta	QGIS	GRASS GIS	GeoDa
Operações Genéricas de Transporte	Bom	Bom	Bom
Manipulação de Matrizes	Bom	Bom	Bom
Análise de Caminho Mínimo	Bom	Bom	Inexplorado
Problemas de Roteirização	Médio	Bom	Inexplorado
Partições, Clustering e Regionalização	Bom	Bom	Bom
Localização de Centros	Ruim	Bom	Inexplorado
Modelos de Previsão de Demanda	Médio	Ruim	Médio
Visualização para dados de transporte	Bom	Bom	Bom
Operações desejáveis em ambiente dinâmico*	Ruim	Ruim	Ruim
*Essas operações ainda não são verificadas mesmo em SIG-Ts comerciais			

Fonte: Autor (2016).

Um dos principais resultados encontrados é que nenhum dos softwares utilizados consegue resolver o problema de previsão de demanda de forma satisfatória e, conforme discutido anteriormente, a previsão de demanda é uma das etapas cruciais para o planejamento de transportes. Além disso, a realidade de SIGs *open source* operarem em ambiente dinâmico ainda parece distante, visto que, nenhum consegue realizar essas operações nem mesmo de forma parcial.

Portanto, considerando as características essenciais para um SIG-T descritas por Waters (1999), é possível afirmar que ainda não existem ferramentas de código aberto que executam todas as tarefas desejáveis para um SIG-T.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A principal contribuição deste trabalho é prestar auxílio aos usuários de tecnologia SIG na escolha de ferramentas mais adequadas e, secundariamente, evidenciar o potencial do uso de SIG código aberto em diversas etapas do planejamento de transportes.

O sucesso do planejamento está atrelado à escolha e uso de ferramentas adequadas para seu desenvolvimento, sendo que, comumente é necessário combinar várias ferramentas para a obtenção dos resultados pretendidos. A complexidade do planejamento de transportes exige que os planejadores não estejam restritos a um único instrumento de análise.

Sistemas de Informação de Geográfica podem ser utilizados desde a etapa de coleta de dados, no tratamento dos dados, e no emprego de técnicas específicas de planejamento. Cabe salientar que o resultado das análises em ambiente SIG pode ser comprometido pela completude dos dados utilizados, ou pela complexidade das ferramentas oferecidas por cada software.

O problema da geração de viagens de Joinville evidenciou que até mesmo a amostragem de entrevistas domiciliares pode interferir diretamente na qualidade dos resultados obtidos. Enquanto isso, o problema de alocação de viagens pode ser resolvido por modelos pouco refinados, como a da alocação tudo-ou-nada, que nem sempre representará com confiabilidade o comportamento dos usuários de uma rede de transporte.

Os resultados encontrados apontam que, o QGIS, GRASS GIS e GeoDa puderam ser aplicados em diversas categorias de análise em transporte, entretanto, as três ferramentas não se enquadram inteiramente na categoria de SIG-T. Os SIGs estudados não conseguiram aplicar completamente modelos de previsão de demanda, ou não forneceram resultados suficientemente satisfatórios.

Conforme discutido anteriormente, a previsão de demanda é uma das etapas cruciais para o planejamento de transportes. Porém, apesar de softwares comerciais como o TransCAD oferecerem ferramentas de análise de demanda, essas ferramentas estão restritas ao modelo *tradicional* de 4 etapas. Portanto, a aplicação de modelos *modernos* exigiria recursos que não são oferecidos no TransCAD ou em SIGs *open source*.

Por conta disso, é válida a discussão futura de até que ponto ferramentas comerciais podem de fato levar a resultados mais corretos em detrimento às ferramentas *open source*. Considerando o surgimento de novas alternativas de fácil obtenção, distribuição e manipulação do código-fonte, é essencial que planejadores esgotem sua instrumentação de análise.

Os softwares estudados são mais novos do que o TransCAD. Portanto, ainda há espaço para aprimoramento no QGIS e, em complementos como o AequilibraE. Para finalizar, este estudo traz o questionamento se a definição de SIG-T, suas operações e capacidades, são suficientes para os problemas do planejamento de transportes moderno.

O constante aumento na complexidade das análises de planejamento pode requerer instrumentos que não foram considerados nos estudos de Waters (1999), inevitavelmente o conceito de SIG-T precisará ser reformulado de acordo com as exigências do planejamento atual e futuro.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

A principal motivação de estudo é um comparativo direto entre a aplicação de softwares comerciais e ferramentas livres em problemas relacionados ao transporte. Secundariamente, é válido corrigir problemas encontrados neste trabalho e avaliar, de forma aprofundada, os SIGs que não foram suficientemente explorados (GRASS GIS e GeoDa).

O caráter de livre implementação no QGIS permite ao usuário o acesso ao código fonte do programa e dos complementos existentes. Portanto, é possível verificar o motivo de discrepância nos resultados encontrados para o problema de alocação de viagens. Além disso, é possível acrescentar ao AequilibraE outros modelos de alocação, assim como modelos de geração de viagens, distribuição de

viagens e escolha modal. Cabe salientar que o AequilibraE não é um complemento oficial do QGIS, portanto ainda não se encontra em uma versão estável.

O software GeoDa permite vários métodos de regressão (além da linear múltipla), inclusive de regressão espacial. Esses modelos de regressão são passíveis de estudo, visto que Lopes (2005a) demonstra o aumento na qualidade dos resultados quando fatores espaciais são incluídos em análises de regressão.

Além disso, conforme reiterado pela literatura, o atual desafio é conceber e adaptar instrumentos que possam operar em um ambiente dinâmico de planejamento de transportes. Portanto, sugere-se uma revisão do conceito de SIG-T que verifique se essas ferramentas são as mais adequadas para os desafios atuais do planejamento.

As mudanças no planejamento fomentam a hipótese de que o conceito de Sistemas de Informação Geográfica aplicados ao Transporte possa ser ampliado e adaptado para Sistemas de Informação Geográfica aplicados à Mobilidade (SIG-M).

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, E. L. Redescobrimos os SIG com software livre. **Brasil FOSSGIS**. p.19-23, 2011.
- ÂNTICO, C. Deslocamentos pendulares na região metropolitana de São Paulo. **São Paulo em Perspectiva**. v. 19, n. 4, p. 110-120, 2005.
- AZEVEDO FILHO, M. A. N. **Análise do processo de planejamento dos transportes como contribuição para a mobilidade urbana sustentável**. 2012. 190 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2012.
- BIELINSKI JUNIOR, C.; RAIA JUNIOR, A. A.; SILVA, A. N. R.; O Uso de geoprocessamento no planejamento de pesquisa origem-destino no município de São Carlos. In: 3º CONGRESSO LUSO BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO, URBANO, REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL, 2008, Santos, SP. **Anais...** Santos, SP, 2008. Disponível em: <<http://redpgv.coppe.ufrj.br/index.php/pt-BR/producao-da-rede/artigos-cientificos/2008-1/573-o-uso-de-geoprocessamento-no-planejamento-de-pesquisa-origem/file>> Acesso em: 28 out. 2016.
- BODIN, L.D. et al. Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art. **Computers and Operational Research Quarterly**. v. 10, n. 2, p. 63-211, 1983.
- BUSTOS-TURU, G. et al. Integrated planning of distribution networks: interactions between land use, transport and electric vehicle charging demand. In: 23th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 2015, Lyon, FR. **Anais...** Lyon, FR, 2015. Disponível em: <http://cired.net/publications/cired2015/papers/CIRE2015_1382_final.pdf> Acesso em: 18 jun. 2016.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução ao geoprocessamento. In: Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A. M. V; Paiva, J. A.; D'alge, J. C. L. (Org.) **Geoprocessamento: teoria e aplicações**. São José dos Campos, SP: Inpe, 2001, p. 1-5. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro>>. Acesso em: 05 maio 2016.
- CÂMARA, G.; ORTIZ, M. J. Sistemas de informação geográfica para aplicações ambientais e cadastrais: uma visão geral. In: 27º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1998, Poços de Caldas, MG. **Anais...** Poços de Caldas, MG, 1998. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/papers/analise.pdf>>. Acesso em 18 jun. 2016.

CAMPOS, V. B. C. **Planejamento de transportes: conceitos e modelos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2013.

CARMO, E. C.; GOMES, H. A. S.; BARROS NETO, J. F. Roteamento de veículos no transporte rodoviário de cargas: uma aplicação para distribuição de jornais. In: XXXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2003, Natal, RN. **Anais...** Natal, RN, 2003. Disponível em: <<http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2003/>>. Acesso em: 21 abr. 2016.

COSTA, M. S. **Um Índice de Mobilidade Urbana Sustentável**. 2008. 248 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

DIJKSTRA, E. W. A note in two problems in connexion with graphs. **Numerische Mathematik**. p. 269-271, 1959.

DUEKER, K. J.; PENG, Z; R. Geographic information systems for transport (GIS-T). In: Heshner, D.; Button, K. J. **Handbook of Transport Modeling**. Amsterdam: Elsevier, 2008, p. 303-327.

ERMAN, J.; ARLITT, M.; MAHANTI, A. Traffic classification using clustering algorithms. In: SIGCOM'06, Pisa, Italy. **Anais...** Pisa, Italy, 2006. Disponível em: <<http://conferences.sigcomm.org/sigcomm/2006/papers/minenet-01.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2016.

FERRAZ, A. C. P.; TORRES, I. G. E. **Transporte Público Urbano**. 2. ed. São Carlos: Rima, 2004.

HEIKKILA, E. J. GIS is dead. Long live GIS! **APA Journal**. summer 1998, p. 350-360, 1998.

HENRIQUE, C. S. **Diagnóstico Espacial da Mobilidade e da Acessibilidade dos Usuários do Sistema Integrado de Transporte de Fortaleza**. 2004. 165 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de mestrado em engenharia de transportes, Univerisdade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2004.

ILAYARAJA, K. Road network analysis in Neyveli township, cuddalore district by using Quantum GIS. **Indian Journal of Computer Science and Engineering**. v. 4, n. 1, p. 56-61, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010 – agregados por setores censitários dos resultados do universo – Santa Catarina**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais>>. Acesso em: 07 dez. 2016.

LAURINDO, F. J. B. et al. O papel da tecnologia da informação (TI) na estratégia das organizações. **Gestão e Produção**. v. 8, n. 2, p. 160-179, 2001.

LEBLANC, L. J.; MORLOK, E. K.; PIERSKALLA, W. P. An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem. **Transportation Research**. v. 9, p. 309-318, 1975.

LEE, E.; ODUOR, P. G. Using multi-attribute decision factors for a modified all-or-nothing traffic assignment. **ISPRS International Journal of Geo-Information**. v. 4, p. 883-899, 2015.

LEWIS, S. Use of geographical information systems in transportation modeling. **ITE Journal**. n. 3, p 34-38, 1990.

LOIDL, M. et al. GIS and transport modeling – strengthening the spatial perspective. **ISPRS International Journal of Geo-Information**. v. 5, p. 84-107, 2016.

LOPES, S. B. **Efeitos da dependência espacial em modelos de previsão de demanda por transporte**. 2005. 137 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2005a.

LOPES, S.B. **Método de análise de desempenho de vias arteriais urbanas: estudo de caso na cidade de Porto Alegre-RS**. 2005b. (Artigo – mimeo).

LOPES, S. B. **Uma ferramenta para planejamento da mobilidade sustentável com base em modelo de uso do solo e transportes**. 2010. 182 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2010.

LOPES, S. B.; BRONDINO, N. C. M.; SILVA, A. N. R. GIS-Based analytical tools for transport planning: spatial regression models for transportation demand forecast. **ISPRS International Journal of Geo-Information**. v. 3, p. 565-583, 2014.

LOPES, S. B.; BRONDINO, N. C. M.; SILVA, A. N. R. Um estudo da dependência espacial em modelos de previsão de demanda por transportes In: XIV Congresso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte, 2006, Las Palmas de Gran Canaria, España. **Anais...** Las Palmas de Gran Canaria, España, 2006. Disponível em: < <http://www.redpgv.coppe.ufrj.br/index.php/es/produccion/articulos-cientificos/2006-1/254-lobes-brondino-silva-panam2006/file>>. Acesso em: 07 dez. 2016.

LÜBECK et al. Qualidade no transporte coletivo urbano. **Facef Pesquisa**. v. 14, n. 3, p. 264-277, 2011.

MACQUEEN, J. B. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: Proceedings of the fifth Symposium on Math Statistics and Probability, 1967, Berkley, United States of America. **Anais...** Berley, USA: University of California Press, p. 281-297, 1967.

MADEIRA, L. C. A História dos FOSSGIS. **Brasil FOSSGIS**. p. 9-12, 2011.

MARTIN, W. A.; MCGUCKIN, N. A. **Travel estimation techniques for urban planning**. National Cooperative Highway Research Program. Washington: Transportation Research Board – National Research Council, 1998.

MEDEIROS, A. M. L. Cinco razões para começar a usar o QGIS. **Brasil FOSSGIS**. n. 6 p. 44-47, 2012.

MILLER, H. J.; SHAW, S. L. Geographic information systems for transportation in the 21st century. **Geography Compass**. v. 9, n. 4, p. 180-189, 2015.

MORAIS, T. C. **Avaliação e seleção de alternativas para promoção da mobilidade urbana sustentável: o caso de Anápolis, Goiás**. 2012. 141 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2012.

MORLOK, E. K. **Introduction to transportation engineering and planning**. New York: Mcgraw-Hill College, 1978.

MTOI, E. T.; MOSES, R. Calibration and evaluation of link congestion functions: applying intrinsic sensitivity of link speed as a practical consideration to heterogeneous facility types within urban network. **Journal of Transportation Technologies**. v. 4, p. 141-149, 2014.

NYERGES, T. L. GIS support for micro-macro spatial modeling. **Proceedings of AutoCarto**. v. 9, p. 567-579, 1989.

OLIANI, L. O.; PAIVA, C.; ANTUNES, A. F. B. Utilização de softwares livres de geoprocessamento para gestão urbana em municípios de pequeno e médio porte. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2012, Recife, PE. **Anais...** Recife, MG: SIMGEO, 2012. Disponível em: <<https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIV/CD/>>. Acesso em: 18 jun. 2016.

ORTUZAR, J. D.; WILLUMSEN, L. G. **Modelling Transport**. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

PAULA, M. A. A. F. **Estudo de roteirização de veículos empregando o TransCAD: Contribuição para a Distribuição Urbana de Cargas**. 2009. 90 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2009.

PRATA, P. A. **Proposta de um algoritmo para o problema de roteirização do transporte escolar rural**. 2009. 147 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2009.

PEREIRA, J. B. **Um Estudo da Mobilidade da Cidade de Joinville Baseado no Índice de Mobilidade Urbana Sustentável**. 2013. 139 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Centro de Engenharias da Mobilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, SC, 2013.

RAUF, S. et al. Travel behavior of students to campus based spatial in makassar city. In: 18th FSTPT INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 2015, Jember, ID. **Anais...** Jember, ID, 2015. Disponível em: <<http://www.academia.edu/>>. Acesso em: 18 jun. 2016.

ROSE, A. **Uma avaliação comparativa de alguns sistemas de informação geográfica aplicados ao transporte**. 2001. 139 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2001.

ROWELL, R. C. Theory and practice: linear referencing at the Idaho Transportation Department. **Proceedings GIS-T 96, Geographic Information Systems for Transportation Symposium**. Washington DC, American Association of State Highway and Transportation Officials. p. 1-9, 1996.

SANTOS, L.; RAIA JUNIOR, A. A. Distribuição espacial dos acidentes de trânsito em São Carlos (SP): identificação de tendências de deslocamento através da técnica de elipse de desvio padrão. **Caminhos de Geografia**. v. 7, n. 18, p. 134-145, 2006.

SHEFFI, Y. **Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc, 1985.

SILVA, T. C. S.; OLIVEIRA, R. L.; LIMA, J. P. Caracterização e roteirização do transporte coletivo por ônibus de Itajubá-MG utilizando SIG-T. In: XXXI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2011, Belo Horizonte, MG. **Anais Eletrônicos da Associação Brasileira de Engenharia de Produção**. Belo Horizonte, MG: ENEGEP, 2011. Disponível em: <<http://www.abepro.org.br/publicacoes/>>. Acesso em: 21 abr. 2016.

SOUZA, A. F. et al. Tecnologia CAD/CAM – definições e estado da arte visando auxiliar sua implantação em um ambiente fabril. In: XXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2003, Ouro Preto, MG. **Anais Eletrônicos da Associação Brasileira de Engenharia de Produção**. Ouro Preto, MG: ENEGEP, 2003. Disponível em: <<http://www.abepro.org.br/biblioteca/>>. Acesso em: 29 maio 2016.

STEVENSON, W. J. **Estatística Aplicada à Administração**. São Paulo: Harbra, 2001.

TAAFFEE, E. J.; GAUTHIER, H. L.; O'KELLY, M. E. **Geography of transportation**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.

TEIXEIRA, A. P.; BATISTA JR, E. D.; SENNE, E. L. F. Análise comparativa entre sistemas de apoio à decisão utilizados no planejamento de transportes. In: XXII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2002, Curitiba, PR. **Anais Eletrônicos da Associação Brasileira de Engenharia de Produção**. Curitiba, PR: ENEGEP, 2002. Disponível em: <<http://www.abepro.org.br/publicacoes/index.asp?pchave=&ano=2002>>. Acesso em: 21 abr. 2016.

VIVIANI, E. **A utilização de um sistema de informação geográfica como auxílio à gerência de manutenção de estradas não-pavimentadas**. 1998, Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1998.

VUCHIC, V. R. **Urban transit: operations, planning and economics**. Hoboken: Wiley, 2005.

WAERDEN, P. V. D.; TIMMERMANS, H. Transportation planning and the use of TransCAD. **Transportes**. v. 4, n. 1, 1996. Disponível em: <<http://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/290>>. Acesso em: 21 abr. 2016.

WAGSTAFF, K. et al. Constrained k-means clustering with background knowledge. In: Proceedings of the Eighteenth International Conference on Machine Learning, 2001, Williamstown, United States of America. **Anais...** Williamstown, USA: ICML, p. 577-584, 2001. Disponível em: <<https://web.cse.msu.edu/~cse802/notes/ConstrainedKmeans.pdf>>. Acesso em: 09 dez. 2016.

WARDROP, J. G. Some theoretical aspects of road traffic research. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**. n. 3, p. 325-362, 1952.

WATERS, N. M. Transportation GIS: GIS-T. **Geographical Information Systems**. v. 2, p. 827-844, 1999.

ZUIDGEEST, M. H. P.; BRUSSEL, M. J. G.; MARSEEVEN, M. F. A. M. V. GIS for sustainable urban transport. **ISPRS International Journal of Geo-Information**. v. 4, p. 2583-2585, 2015.