

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

LARISSA LIMONGI AGUIAR

Dimensionamento de frota em sistemas de distribuição em dois estágios: estudo de caso
de entregas urbanas de comércio eletrônico em São Paulo (Brasil)

São Paulo
2024

LARISSA LIMONGI AGUIAR

Dimensionamento de frota em sistemas de distribuição em dois estágios: estudo de caso de entregas urbanas de comércio eletrônico em São Paulo (Brasil)

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração:
Engenharia de Sistemas Logísticos

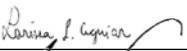
Orientador: Prof. Dr.
Hugo Tsugunobu Yoshida Yoshizaki

São Paulo
2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 25 de março de 2024

Assinatura do autor: 
Assinatura do orientador: 

Catálogo-na-publicação

Aguiar, Larissa Limongi Aguiar

Dimensionamento de frota em sistemas de distribuição em dois estágios: estudo de caso de entregas urbanas de comércio eletrônico em São Paulo (Brasil) / L. L. A. Aguiar -- versão corr. -- São Paulo, 2024. 158 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

1.Logística urbana 2.Dimensionamento de frota 3.Comércio eletrônico 4.Sistemas de distribuição em dois estágios 5.Aproximação contínua I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II.t.

AGUIAR, Larissa Limongi

Dimensionamento de frota em sistemas de distribuição em dois estágios: estudo de caso de entregas urbanas de comércio eletrônico em São Paulo (Brasil)

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Julgamento: _____

Dedico este trabalho a Edson,
Thaís e Tiago

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Hugo T. Y. Yoshizaki, pela orientação, direcionamento e atenção.

À Universidade de São Paulo, pela oportunidade de aprendizado e aprimoramento.

À Banca Examinadora e aos colegas de pesquisa do CISLog, pelas discussões valiosas e pelos ensinamentos.

A toda minha família, pelo incentivo.

À minha mãe, Thaís, pela motivação e acolhimento.

Ao meu pai, Edson (*in memoriam*), por ter me incentivado a sempre estudar e por ter me inspirado a cursar Engenharia.

Ao meu companheiro, Tiago, pela compreensão e apoio contínuo.

À Nossa Senhora.

RESUMO

AGUIAR, L. L. **Dimensionamento de frota em sistemas de distribuição em dois estágios:** estudo de caso de entregas urbanas de comércio eletrônico em São Paulo (Brasil). 2024. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

O objetivo precípua deste trabalho consiste em explorar um problema de distribuição de comércio eletrônico em megacidade, com foco na definição do dimensionamento da frota, a partir de um estudo de caso usando dados reais de entrega de um grande varejista brasileiro, que atende a região de São Paulo (Brasil). Pretende-se explorar compensações de custos de distribuição, comparando um cenário base de sistema de distribuição em estágio único com cenários de distribuição em dois estágios. Assim, no cenário inicial, as mercadorias são transportadas diretamente do centro de distribuição até os clientes finais, através de uma frota homogênea. E nos cenários de dois estágios, as mercadorias passam por instalação intermediária dentro da cidade, e são transportadas aos clientes por frotas heterogêneas.

Primeiramente, são estudadas as características da região de entregas, como a distribuição de demanda e a rede viária para distintos modos de transporte. Através de informações da base Open Street Maps, são obtidos fatores de circulação local para veículos motorizados e não-motorizados, no intuito de avaliar dificuldades de tráfego. E, através de técnicas de análise espacial, busca-se compreender se há formação de regiões homogêneas em densidade de demanda, suficientes para delimitar distritos logísticos homogêneos.

O próximo passo compreende uma análise exploratória dos custos de distribuição e das dimensões das frotas. Por se tratar de um problema de distribuição de grande escala, um método de aproximação contínua é empregado para obter o dimensionamento médio da frota de cada tipo de veículo necessária para atender cada distrito logístico. Nesse sentido, diferentes divisões distritais são exploradas nas formulações de aproximação, como grade de segmentos regulares e divisões administrativas. Além da análise da influência das divisões, também são realizadas análises de sensibilidade sobre a disponibilidade de veículos, com intuito de identificar a influência dos distintos modos de transporte nos custos de distribuição. E, por fim, avalia-se a influência nos custos de distribuição dos dois tipos de sistemas – em estágio único e em dois estágios, através de um modelo de programação linear inteira, que permite efetuar a designação dos distritos para os tipos de veículos de forma otimizada.

Palavras-chave: Logística Urbana; Dimensionamento de Frota; Comércio Eletrônico; Distribuição em Dois Estágios; Aproximação Contínua; Otimização; Análise Espacial

ABSTRACT

AGUIAR, L. L. **Fleet sizing in two-echelon distribution systems:** case study of urban e-commerce deliveries in Sao Paulo (Brazil). 2024. Thesis (Master) – Polytechnic School, University of Sao Paulo, Sao Paulo, 2024.

The main objective of this work is to explore an e-commerce distribution problem in a megacity, with a focus on defining the fleet size, based on a case study using real delivery data from a large Brazilian retailer, which serves the region of São Paulo (Brazil). It is intended to explore compensation of distribution costs, comparing a baseline scenario of a distribution system in single-echelon with two-echelon scenarios. Thus, in the initial scenario, the goods are transported directly from the distribution center to the final customers, through a homogeneous fleet. And in the two-echelon scenarios, the goods pass through intermediate facility within the city, to then be transported to the final customers, through heterogeneous fleets.

First, the characteristics of the delivery region are studied, such as demand distribution and the transportation network for different modes. Through information from the Open Street Maps base, local circuitry factors are obtained for motorized and non-motorized vehicles, in order to evaluate traffic difficulties. And, through spatial analysis techniques, we seek to understand whether there is formation of homogeneous regions in demand density, sufficient to delimit homogeneous logistics districts.

The next step comprises an exploratory analysis of distribution costs and the sizes of heterogeneous fleets. As this is a large-scale distribution problem, a continuous approximation method is used to obtain the average fleet size of each type of vehicle needed to serve each logistics district. In this sense, different district divisions are explored in approximation formulations, such as the grid of regular segments and administrative divisions. In addition to analyzing the influence of the divisions, we conduct sensitivity analysis on the availability of vehicles, with the objective of identifying the influence of different modes of transport on distribution costs. And, finally, the influence on the distribution costs of the two types of systems is evaluated - in a single echelon and in two echelon, through an integer linear programming model, which makes it possible to assign districts to vehicle types in an optimal way.

Keywords: Urban Logistics; Fleet Size; E-commerce; Two-Echelon Distribution Systems; Continuous Approximation; Optimization; Spatial Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de configuração de problema 2E-VRP capacitado (Cuda <i>et al.</i> , 2015) ...	28
Figura 2: Divisão em distritos de entrega (Daganzo, 1984)	30
Figura 3: Heterogeneidade de fatores de circuito de rede observados em São Paulo (Merchán <i>et al.</i> , 2019b)	32
Figura 4: Classificação dos segmentos de 1km ² usando análise de clusters (Merchán <i>et al.</i> , 2019b)	33
Figura 5: Gráfico de espalhamento de Moran (Câmara <i>et al.</i> , 2004)	53
Figura 6: Sistema de distribuição em estágio único, com frota regular e sistema em dois estágios, com frota heterogênea (elaboração própria)	56
Figura 7: Cruzamento da Avenida Rebouças e Avenida Brasil. (1) Representação de segmento de 1km ² gerado através do OSMnx (Boeing, 2017); (2) Representação pela interface do Google Maps (Google Maps, 2022).....	64
Figura 8: Área de serviço na cidade de São Paulo (elaboração própria)	66
Figura 9: Fluxograma de aplicação do método.....	75
Figura 10: Distribuição de fatores de circuito para veículos motorizados, em função da distância euclidiana entre pares de pontos (elaboração própria)	78
Figura 11: Distribuição de fatores de circuito para veículos não-motorizados, em função da distância euclidiana entre pares de pontos (elaboração própria)	78
Figura 12: Distribuição de fatores de circuito para caminhada, em função da distância euclidiana entre pares de pontos (elaboração própria).....	79
Figura 13: <i>Boxplot</i> dos fatores de circuito médios dos segmentos de uma região de São Paulo, para veículos motorizados e não-motorizados (elaboração própria)	79
Figura 14: Mapa temático representando os fatores de circuito médios identificados nos segmentos da região de São Paulo em estudo, considerando automóveis (elaboração própria)	80
Figura 15: Mapa temático representando os fatores de circuito médios identificados nos segmentos da região de São Paulo em estudo, considerando bicicletas (elaboração própria).....	81
Figura 16: <i>Box map</i> representando a densidade de PODs nos setores censitários, em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)	84
Figura 17: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos setores censitários, em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)	85

Figura 18: <i>Box map</i> representando a densidade de PODs nos distritos urbanos, em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)	85
Figura 19: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos distritos urbanos, em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)	86
Figura 20: <i>Box map</i> representando a densidade de PODs nos segmentos de 1km ² , em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)	86
Figura 21: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 1km ² , em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)	87
Figura 22: <i>Box map</i> representando a densidade de PODs nos segmentos de 0,25km ² , em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)	87
Figura 23: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 0,25km ² , em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria) ..	88
Figura 24: <i>Box map</i> representando a densidade de PODs nos segmentos de 4km ² , em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)	89
Figura 25: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 4km ² , em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)	89
Figura 26: <i>Box map</i> representando a densidade de PODs nos segmentos de 9km ² , em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)	90
Figura 27: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 9km ² , em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)	90
Figura 28: <i>Box map</i> representando a densidade de PODs nos setores censitários, em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)	91
Figura 29: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos setores censitários, em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)	92
Figura 30: <i>Box map</i> representando a densidade de PODs nos distritos urbanos, em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)	93
Figura 31: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos distritos urbanos, em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)	94
Figura 32: <i>Box map</i> representando a densidade de PODs nos segmentos de 1km ² , em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)	94
Figura 33: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 1km ² , em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)	95
Figura 34: <i>Box map</i> representando a densidade de PODs nos segmentos de 0,25km ² , em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)	95

Figura 35: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 0,25km ² , em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)	96
Figura 36: <i>Box map</i> representando a densidade de PODs nos segmentos de 4km ² , em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)	96
Figura 37: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 4km ² , em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)	97
Figura 38: <i>Box map</i> representando a densidade de PODs nos segmentos de 9km ² , em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)	97
Figura 39: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 9km ² , em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)	98
Figura 40: <i>Box map</i> representando a densidade de PODs nos setores censitários, em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)	99
Figura 41: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos setores censitários, em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)	99
Figura 42: <i>Box map</i> representando a densidade de PODs nos distritos urbanos, em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)	100
Figura 43: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos distritos urbanos, em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)	100
Figura 44: <i>Box map</i> representando a densidade de PODs nos segmentos de 1km ² , em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)	101
Figura 45: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 1km ² , em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria).....	101
Figura 46: <i>Box map</i> representando a densidade de PODs nos segmentos de 0,25km ² , em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)	102
Figura 47: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 0,25km ² , em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)..	102
Figura 48: <i>Box map</i> representando a densidade de PODs nos segmentos de 4km ² , em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)	103
Figura 49: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 4km ² , em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria).....	103
Figura 50: <i>Box map</i> representando a densidade de PODs nos segmentos de 9km ² , em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)	104
Figura 51: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 9km ² , em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria).....	104

Figura 52: Gráfico da dimensão da frota homogênea de vans para atender o segundo estágio nos cenários de demanda x tipos de divisões distritais (elaboração própria)	106
Figura 53: Gráfico do custo de distribuição da frota homogênea de vans para atender o segundo estágio nos cenários de demanda x tipos de divisões distritais (elaboração própria)	107
Figura 54: Gráfico da dimensão da frota homogênea de bicicletas para atender o segundo estágio nos cenários de demanda x tipos de divisões distritais (elaboração própria)	108
Figura 55: Gráfico do custo de distribuição da frota homogênea de bicicletas para atender o segundo estágio nos cenários de demanda x tipos de divisões distritais (elaboração própria)	108
Figura 56: <i>Boxplot</i> do número de vans necessário para atender cada parte do território de entrega, considerando diferentes tipos de divisões distritais, em cenário de média demanda (elaboração própria)	110
Figura 57: <i>Boxplot</i> do número de vans necessário para atender cada parte do território de entrega, considerando diferentes tipos de divisões distritais, em cenário de alta demanda (elaboração própria)	110
Figura 58: <i>Boxplot</i> do número de vans necessário para atender cada parte do território de entrega, considerando diferentes tipos de divisões distritais, em cenário de baixa demanda (elaboração própria)	111
Figura 59: <i>Boxplot</i> do número de bicicletas necessário para atender cada parte do território de entrega, considerando diferentes tipos de divisões, em cenário de média demanda (elaboração própria)	111
Figura 60: <i>Boxplot</i> do número de bicicletas necessário para atender cada parte do território de entrega, considerando diferentes tipos de divisões, em cenário de alta demanda (elaboração própria)	112
Figura 61: <i>Boxplot</i> do número de bicicletas necessário para atender cada parte do território de entrega, considerando diferentes tipos de divisões, em cenário de baixa demanda (elaboração própria)	112
Figura 62: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 1km ² em dia de alta demanda (elaboração própria)	113
Figura 63: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 1km ² em dia de média demanda (elaboração própria)	114

Figura 64: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 1km ² em dia de baixa demanda (elaboração própria).....	114
Figura 65: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 4km ² em dia de alta demanda (elaboração própria).....	115
Figura 66: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 4km ² em dia de média demanda (elaboração própria).....	116
Figura 67: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 4km ² em dia de baixa demanda (elaboração própria).....	116
Figura 68: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 9km ² em dia de alta demanda (elaboração própria).....	117
Figura 69: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 9km ² em dia de média demanda (elaboração própria).....	117
Figura 70: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 9km ² em dia de baixa demanda (elaboração própria).....	118
Figura 71: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 0,25km ² em dia de alta demanda (elaboração própria).....	118
Figura 72: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 0,25km ² em dia de média demanda (elaboração própria).....	119
Figura 73: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 0,25km ² em dia de baixa demanda (elaboração própria).....	119
Figura 74: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos distritos administrativos em dia de alta demanda (elaboração própria).....	120

Figura 75: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos distritos administrativos em dia de média demanda (elaboração própria).....	121
Figura 76: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos distritos administrativos em dia de baixa demanda (elaboração própria).....	121
Figura 77: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos setores censitários em dia de alta demanda (elaboração própria).....	122
Figura 78: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos setores censitários em dia de média demanda (elaboração própria).....	122
Figura 79: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos setores censitários em dia de baixa demanda (elaboração própria).....	123
Figura 80: Exemplo de segmento da região de serviço, com dimensões de frota e distâncias obtidas para diferentes divisões distritais (elaboração própria).....	125
Figura 81: Gráfico do custo de distribuição para atender o segundo estágio, em cenário de alta demanda e com restrição de veículos (elaboração própria).....	127
Figura 82: Gráfico do dimensionamento das frotas para atender o segundo estágio, em cenário de alta demanda e com restrição de veículos (elaboração própria).....	128
Figura 83: Gráfico do custo de distribuição para atender o segundo estágio, em cenário de média demanda e com restrição de veículos (elaboração própria).....	128
Figura 84: Gráfico do dimensionamento das frotas para atender o segundo estágio, em cenário de média demanda e com restrição de veículos (elaboração própria).....	129
Figura 85: Gráfico do custo de distribuição para atender o segundo estágio, em cenário de baixa demanda e com restrição de veículos (elaboração própria).....	129
Figura 86: Gráfico do dimensionamento das frotas para atender o segundo estágio, em cenário de baixa demanda e com restrição de veículos (elaboração própria).....	130
Figura 87: Gráfico dos custos de distribuição usando frotas homogêneas para transporte direto até a área de serviço, considerando distritos administrativos (elaboração própria)....	131
Figura 88: Gráfico dos custos de distribuição usando sistema em dois estágios, com frota homogênea no 1º estágio e frota heterogênea para transporte em 2º estágio até a área de serviço, segmentada em distritos administrativos (elaboração própria).....	132

Figura 89: Gráfico dos custos de distribuição usando frotas homogêneas para transporte direto até a área de serviço, considerando segmentos de 1km ² (elaboração própria)	132
Figura 90: Gráfico dos custos de distribuição usando sistema em dois estágios, com frota homogênea no 1º estágio e frota heterogênea para transporte em 2º estágio até a área de serviço, segmentada em segmentos de 1km ² (elaboração própria).....	133
Figura 91: Exemplo de bicicleta elétrica cargueira (BikeMoto, 2023).....	145
Figura 92: Exemplo de sistema de reboque com 3 rodas e capacidade de 200kg (Carla Cargo, 2023)	146
Figura 93: Gráfico da dimensão da frota homogênea de vans para atender o segundo estágio no cenário de média demanda x tipos de divisões distritais e de <i>line-haul</i> (elaboração própria)	152
Figura 94: Gráfico da dimensão da frota homogênea de vans para atender o segundo estágio no cenário de alta demanda x tipos de divisões distritais e de <i>line-haul</i> (elaboração própria)	152
Figura 95: Gráfico da dimensão da frota homogênea de vans para atender o segundo estágio no cenário de baixa demanda x tipos de divisões distritais e de <i>line-haul</i> (elaboração própria)	153
Figura 96: Gráfico da dimensão da frota homogênea de bicicletas para atender o segundo estágio no cenário de média demanda x tipos de divisões distritais e de <i>line-haul</i> (elaboração própria).....	153
Figura 97: Gráfico da dimensão da frota homogênea de bicicletas para atender o segundo estágio no cenário de alta demanda x tipos de divisões distritais e de <i>line-haul</i> (elaboração própria).....	154
Figura 98: Gráfico da dimensão da frota homogênea de bicicletas para atender o segundo estágio no cenário de baixa demanda x tipos de divisões distritais e de <i>line-haul</i> (elaboração própria).....	154
Figura 99: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 1km ² em dia de média demanda, considerando distância de <i>line-haul</i> nula (elaboração própria).....	155
Figura 100: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 1km ² em dia de alta demanda, considerando distância de <i>line-haul</i> nula (elaboração própria).....	156

Figura 101: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 1km ² em dia de baixa demanda, considerando distância de <i>line-haul</i> nula (elaboração própria).....	156
Figura 102: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 1km ² em dia de média demanda, considerando distâncias de <i>line-haul</i> equivalentes a 50% das reais (elaboração própria)	157
Figura 103: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 1km ² em dia de alta demanda, considerando distâncias de <i>line-haul</i> equivalentes a 50% das reais (elaboração própria)	157
Figura 104: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 1km ² em dia de baixa demanda, considerando distâncias de <i>line-haul</i> equivalentes a 50% das reais (elaboração própria)	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais contribuições e diferenças dos trabalhos revisados	46
Tabela 2 – Cenários para análise espacial das densidades de demanda	68
Tabela 3 - Parâmetros considerados para os tipos de veículos	71
Tabela 4 - Dimensionamento e custos de frotas heterogêneas no segundo estágio.....	124
Tabela 5 - Custos totais e unitários de distribuição de última milha, usando diferentes configurações de distribuição para atender os distritos administrativos da região de serviço	134
Tabela 6 - Custos totais e unitários de distribuição de última milha, usando configurações diferentes de distribuição para atender os segmentos de 1km ² da região de serviço.....	135
Tabela 7: Parâmetros do modelo de custos para obtenção dos custos fixos mensais de bicicletas	149
Tabela 8: Parâmetros do modelo de custos para obtenção dos custos variáveis por km para bicicletas	150

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARCE	Augmented Routing Cost Estimation
CA	Continuous Approximation
ESDA	Exploratory Spatial Data Analysis
FSR	Fleet size and routing problem
ILP	Integer linear programming
LC-2EHVRP	Low-carbon two-echelon heterogeneous fleet vehicle routing problem
MILP	Mixed integer linear programming
POD	Point of demand
SDD	Same day delivery
SIG	Sistema de informações geográficas
UTP	Urban transit point
VRP	Vehicle routing problem
2E-CLRP	Two-echelon capacited location routing problem
2E-EVRP	Electric two-echelon routing problem
2E-EVRP-TW	Electric two-echelon routing problem with time windows
2E-LRP	Two-echelon location routing problems
2E-LRP-MVMS	Two-echelon routing problem with mixed vehicles and mixed satellites
2E-VRP	Two-echelon vehicle routing problems
2E-VRPTW-CO-OD	Two-echelon routing problem with time windows, covering options and occasional drivers

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Considerações Iniciais.....	20
1.2 Objetivos do Trabalho.....	21
1.3 Justificativa.....	23
1.4 Organização do Trabalho	24
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	26
2.1 Definição de Distribuição Urbana e Logística Urbana	26
2.2 Conceituação de Sistemas de Distribuição em Dois Estágios.....	27
2.3 Abordagens de Aproximação Contínua e de Distritos Logísticos	29
2.4 Problemas de Gestão de Frotas com Aplicação de Aproximação Contínua	34
2.5 Problemas de Gestão de Frotas em Sistemas de Distribuição de Dois Estágios.....	36
2.6 Problemas sobre Bicicleta de Carga em Operação de Distribuição Urbana	40
2.6 Conclusões da Revisão da Literatura	44
3. MÉTODO.....	46
3.1. Análise Espacial de Dados	50
3.2 Fatores de Circuito em Viagens Locais.....	53
3.3 Modelagem Matemática do Problema e Formulação de Aproximação Contínua	55
3.4 Estudo de Caso	61
3.4.1 Obtenção dos Fatores de Circuito Locais da Rede Viária	62
3.4.2 Aplicação de Análise Espacial aos Dados de Densidades de Demanda.....	65
3.4.3 Aplicação do Modelo Envolvendo Aproximação Contínua e Programação Linear Inteira.....	69
3.4.4 Fluxograma de Aplicação do Método	75
4. RESULTADOS.....	76
4.1 Caracterização da Rede Viária com Fatores de Circuito Locais	76
4.2 Análise Espacial dos Dados de Densidade de Demanda.....	81
4.3 Análises Exploratórias de Dimensão de Frota e de Custos de Distribuição	105
5. CONCLUSÕES	136

ANEXO A: CONSIDERAÇÕES DE CUSTOS DE VEÍCULOS.....	145
ANEXO B: ANÁLISES DE DIMENSÕES E DESIGNAÇÃO DE FROTA CONSIDERANDO DIFERENTES DISTÂNCIAS DE LINE-HAUL	151

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O transporte de cargas é um dos elos mais importantes de sistemas logísticos. Junto com o estoque e o processamento de pedido e de informação, compõe o tripé de sustentação das atividades logísticas, e representa quase dois terços do total dos gastos das operações logísticas brasileiras (Lima Júnior, 2001). O transporte de cargas engloba decisões de planejamento estratégico, como seleção de modal, decisões táticas, como definições sobre dimensionamento e tipo da frota, e decisões operacionais, como roteamento e despacho (Ballou, 2004).

O transporte de cargas em áreas urbanas vem atraindo especial atenção. O crescimento do comércio eletrônico (do inglês, *e-commerce*) se intensificou após o início da pandemia de COVID-19. Segundo o índice SpendingPulse, o comércio eletrônico teve uma expansão de 75% em 2020 no Brasil, chegando a representar 11% das vendas do varejo, partindo de um patamar de 6% antes da pandemia (E-commerce Brasil, 2021a). O incremento na representatividade do comércio eletrônico também foi observado em outros países. Somente nos Estados Unidos, as vendas online atingiram 19% do total de compras no varejo em 2021, valor superior aos 15,5% de 2019 (Young, 2022).

As cadeias de suprimentos que sustentam essas interações do comércio eletrônico abrangem os processos de distribuição de milha intermediária e de última milha (do inglês *middle mile* e *last mile*). A distribuição de milha intermediária compreende as atividades de transporte entre as fontes de suprimentos e as instalações de armazenagem e transbordo. Já a distribuição de última milha compreende as atividades necessárias para o processo de entrega desde o último ponto de transbordo até o ponto final de entrega (Lindner, 2011).

O desejo dos clientes de receber as mercadorias em curto espaço de tempo estimula a competitividade das empresas de comércio eletrônico, que buscam cada vez mais melhorar o nível de serviço e tornar as operações de entrega mais eficientes. Porém, essas operações de distribuição são afetadas por fatores como congestionamentos, restrições horárias de tráfego, limitações de acesso a bairros residenciais, oferta restrita de locais para estacionamento e janelas de tempo. Além disso, o transporte urbano contribui para geração de impactos no ambiente, como emissões de gases poluentes e ruídos.

Assim, garantir eficiência para as operações de distribuição de última milha nas cidades é um desafio permanente. Algumas estratégias para melhorar as operações de transporte podem englobar: consolidação de cargas urbanas, por meio de consolidação de terminais, consolidação de rotas ou de facilidades de despacho e recebimento; programação de remessas e recebimento fora de horário comercial, ou seja, através de operações noturnas (entre 6 da tarde e 6 da manhã); tecnologia dos caminhões e equipamentos e tecnologia do sistema viário, com sistemas avançados de gerenciamento de tráfego, de informações, controle e operações de veículos (Santos e Aguiar, 2001).

Além disso, configurações de sistemas logísticos em dois níveis também têm sido exploradas como estratégias para melhor eficiência. Atualmente, os sistemas multi-estágio estão sendo implantados por vários varejistas *on-line*, como por exemplo, Amazon nos EUA, B2W no Brasil e JD.com na China (Winkenbach e Janjevic, 2018). Nos sistemas de distribuição de dois estágios em cidades, geralmente, as mercadorias são transportadas dos centros de distribuição localizados fora da cidade até instalações satélite localizadas na área urbana, através de veículos grandes, e posteriormente, são transportadas dessas instalações satélite até os clientes finais, através de veículos menores (Huang *et al.*, 2018).

Nesse contexto, a gestão de frotas é uma questão chave para projetar operações de distribuição urbana em dois estágios. Segundo Valente *et al.* (2008), a gestão de frotas consiste na atividade de reger, administrar ou gerenciar um conjunto de veículos, e envolve diferentes serviços, como dimensionamento, especificação de equipamentos, roteirização, custos, manutenção e renovação de veículos. As decisões táticas, foco do trabalho aqui proposto, buscam solucionar aspectos como: dividir regiões de atendimento em distritos de serviço e como selecionar os veículos, isto é, o tipo e a quantidade, para as zonas de serviço em um período de operação.

1.2 Objetivos do Trabalho

O objetivo principal desta pesquisa consiste em avaliar cenários de custos de distribuição de última milha e de dimensionamento de frotas heterogêneas de veículos, comparando um sistema de distribuição de dois estágios com um cenário base de um sistema de distribuição em estágio único. No cenário inicial, as mercadorias são transportadas do centro de distribuição até

os clientes finais, através de uma frota regular homogênea, composta por veículos de grande capacidade. E nos cenários novos propostos, as mercadorias são transportadas do centro de distribuição até uma instalação intermediária dentro da cidade, através de frota homogênea, composta por veículos de grande capacidade, e da instalação intermediária até os clientes finais, através de frotas heterogêneas de veículos de menor capacidade. Para isso, apresenta-se um estudo de caso usando dados reais de entregas de um grande varejista brasileiro de comércio eletrônico, que atende a região de São Paulo (SP, Brasil).

Quanto aos objetivos específicos, estes podem ser descritos como:

- Apresentar um levantamento bibliográfico sobre o uso de modelos de aproximação contínua para decisões táticas de dimensionamento de frota e identificar a literatura existente sobre problemas de distribuição em dois estágios em megacidades, envolvendo decisões de frota, como dimensão, composição, uso de frotas heterogêneas e de bicicletas de carga;
- Estudar dificuldades para trafegar em rede urbana, a partir do estudo de fatores de circuito locais para veículos motorizados e veículos não-motorizados, como vans e bicicletas de carga;
- Analisar as distribuições espaciais de densidades de demanda e investigar se há formação de regiões homogêneas em demanda, através de análise de dados espacial;
- Descrever a caracterização do problema com sistema de fase única e sistema de distribuição em dois estágios, através de método de aproximação contínua e otimização linear inteira;
- Avaliar os reflexos de usar configurações variáveis de distritos de atendimento na designação da frota e nos custos de distribuição;
- Avaliar a influência do uso de diferentes modos de transporte nos custos de distribuição, através de cenários variando a composição da frota por veículos motorizados e não motorizados;
- Avaliar a influência dos cenários de demanda, isto é, de alta, média e baixa demanda, na designação da frota otimizada;
- Avaliar as compensações de custos de distribuição, ao operar a frota com sistema de dois estágios, comparativamente a sistema de estágio único.

1.3 Justificativa

Apesar de um crescente interesse na área de logística e cadeias de suprimentos no comércio eletrônico, as perspectivas de pesquisa não têm focado em problemas de planejamento de frota. Os assuntos mais discutidos sobre operação de cadeias de suprimentos concentram-se em otimização e eficiência, sustentabilidade e tecnologias alternativas, envolvendo principalmente processos de armazenagem e processos de transporte e localização, voltados para distribuição de última milha (Aguiar *et al.*, 2022). Já alguns processos como previsão de demanda, planejamento de frota, planejamento e localização de estoques, design de rede e compras, não são citados na literatura com a mesma frequência (Aguiar *et al.*, 2022).

As contribuições de estudar o planejamento de frotas na distribuição urbana são múltiplas. Para o setor privado, é relevante dispor de métodos de fácil aplicação para subsidiar decisões orientadas à eficiência das operações de entrega. E para o setor público, é importante que as políticas de planejamento urbano e de tráfego viabilizem o uso de modos alternativos no transporte urbano de cargas, como de bicicletas. As melhorias dos sistemas de transporte são essenciais para o desenvolvimento urbano sustentável e estão diretamente relacionadas ao ODS 11 da Organização das Nações Unidas (UNDP, 2023), que trata sobre Cidades e Comunidades Sustentáveis. Isso porque essas melhorias implicam na redução de impactos ambientais do transporte de carga nas cidades, como congestionamentos e poluição.

A partir de uma revisão da literatura, nota-se que os estudos sobre distribuição urbana em dois estágios, geralmente, exploram decisões de localização de instalações e definições de roteiros e operação de veículos, usando métodos de otimização exatos e heurísticos. Esses trabalhos incorporam as decisões de frota, como escolha de tipos de veículos, aos problemas de roteirização e localização (por exemplo, Breunig *et al.*, 2019; Wang e Wen, 2020; Yu *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2021 e Akbay *et al.*, 2022).

Entretanto, nem sempre é prático lidar com abordagens a nível de roteiros de entregas, principalmente em cenários de grande escala, que recaem em problemas NP-difíceis (do inglês, *NP-hard*). A nível de cidade, as abordagens de aproximação podem ser úteis para comparar impactos em custos gerais de distribuição, ao introduzir mudanças a nível estratégico, como de reconfiguração de operação de entregas para múltiplos estágios, ou de composição de frotas, por exemplo. Também podem auxiliar a tomada de decisão em cenários de variações atípicas

de demanda, em que é necessário estimar o impacto na quantidade requerida de veículos de distribuição, e comparar cenários de subcontratação de frota e de postergação de entregas. Nesse sentido, o uso de abordagem de aproximação contínua para resolução de problemas de gestão de frota é pertinente e permite obter uma visão de custos envolvidos, comparar alternativas e, portanto, compor cenários para tomada de decisões.

Esse tipo de abordagem em problemas de distribuição em dois estágios é escasso na literatura. Mesmo em problemas de estágio único, a literatura sobre gestão de frotas empregando modelos de aproximação contínua é pouco explorada. Diante deste panorama, propõe-se um trabalho que visa contribuir para a literatura sobre aplicações de aproximação contínua na caracterização de frotas de distribuição urbana.

A partir de um estudo de caso de entregas de comércio eletrônico na cidade de São Paulo (SP, Brasil), pretende-se fornecer respostas para as seguintes questões de pesquisa:

- Há diferenças relevantes para trafegar localmente usando diferentes modos de transporte? Ou seja, como se comportam os fatores de circuito locais, usando veículos motorizados e não-motorizados?
- A partir de dados de densidade de pontos de demanda, são encontradas relações de vizinhança significativas para definir regiões homogêneas, ou seja, distritos logísticos homogêneos em demanda?
- Quais os reflexos de empregar distritos logísticos variáveis na área de atendimento do satélite, para o dimensionamento da frota e custos de distribuição? Qual a sensibilidade?
- Quais os impactos nos custos de transporte, entre adotar configuração de distribuição em dois estágios e sistema de distribuição direta?

1.4 Organização do Trabalho

O texto deste trabalho está organizado em quatro capítulos. O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre os temas relevantes para o problema estudado: i) definição de distribuição urbana e logística urbana; ii) conceituação de sistemas de distribuição em dois estágios; iii) abordagens de aproximação contínua e de distritos logísticos; iv) problemas de gestão de frotas com aplicação de aproximação contínua; v) problemas de gestão de frotas em sistemas de distribuição de dois estágios e vi) uso de bicicletas de carga em distribuição urbana.

O Capítulo 3 discorre sobre o método proposto e o procedimento executado, que envolve modelos de aproximação contínua e programação linear inteira e técnicas de estatística espacial.

O Capítulo 4 discorre sobre os resultados encontrados, com intuito de responder às perguntas de pesquisa.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões e oportunidades futuras de pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O objetivo desta revisão é investigar trabalhos que apliquem modelos de aproximação contínua em abordagens táticas de composição e dimensionamento de frota, e compreender a literatura existente sobre sistemas de distribuição em dois estágios, envolvendo decisões de frota, uso de frotas heterogêneas e uso de bicicletas de carga.

Este capítulo está dividido em sete subseções, de forma que as seis primeiras dividem os artigos revisados nos tópicos seguintes:

- i) Definição de Distribuição Urbana e Logística Urbana
- ii) Conceituação de Sistemas de Distribuição em Dois Estágios
- iii) Abordagens de Aproximação Contínua e de Distritos Logísticos
- iv) Problemas de Gestão de Frotas com Aplicação de Aproximação Contínua
- v) Problemas de Gestão de Frotas em Sistemas de Distribuição de Dois Estágios
- vi) Problemas sobre Bicicletas de Carga em Operação de Distribuição Urbana

A última seção apresenta as conclusões gerais da literatura relevante para este trabalho.

2.1 Definição de Distribuição Urbana e Logística Urbana

A distribuição de mercadorias objetiva transportar os produtos para os locais necessários, no momento adequado e com o nível de serviço esperado pelos clientes, de forma eficiente, ou seja, pelo menor custo possível (Novaes, 2001). Além disso, a distribuição em áreas urbanas abrange fluxos em larga escala de bens, correspondências e resíduos, e compreende além do transporte, atividades como: carga e descarga, armazenamento e acondicionamento de mercadorias (Dablanc, 2007).

As preocupações com o desempenho do transporte de cargas e objetivos pretendidos nos sistemas logísticos alteraram no decorrer dos anos. Poist (1989) apresenta uma classificação do desempenho do transporte de cargas, identificando três eras logísticas distintas: na era pré-logística, o foco está na redução do custo do transporte, tanto de frotas contratadas como de frotas próprias; na segunda era, designada logística, o conceito de desempenho compreende custos de componentes da logística da organização, principalmente o estoque, e os aspectos relativos à qualidade e nível de serviço, o que coloca em destaque os relacionamentos ou *trade-*

offs entre custos e serviços logísticos, no âmbito da organização e da cadeia logística; e na terceira era, denominada neológica, o desempenho do sistema engloba a relação com o meio, desde a matéria-prima e todos os fornecedores até o cliente final e todos os resultados para a sociedade. Assim, fatores tratados como externalidades, como impactos ambientais e sociais, passam a compor as análises de desempenho do transporte (Lima Júnior, 2001).

Nesse sentido, as definições da literatura sobre distribuição e logística urbana consideram tanto a perspectiva econômica como ambiental e social. Taniguchi *et al.* (2001) definem logística urbana como um processo de otimização de ações de distribuição urbana, considerando aspectos ambientais, como congestionamento do tráfego, econômicos, financeiros e energéticos. Para Rodrigue *et al.* (2001), a logística urbana compreende estratégias para melhorar o desempenho da movimentação de bens urbanos e mitigar os impactos das externalidades sociais e ambientais. Portanto, um aspecto comum às definições de logística urbana é o objetivo de encontrar maneiras eficientes e eficazes de transportar bens em áreas urbanas, levando em conta os efeitos de congestionamento, segurança e meio ambiente (Savelsbergh e Van Woensel, 2016).

2.2 Conceituação de Sistemas de Distribuição em Dois Estágios

A implementação de sistemas de distribuição de dois níveis tem sido explorada como uma forma de transportar cargas em áreas urbanas de forma mais eficiente, tanto do ponto de vista de custos, como de externalidades. Segundo Cuda *et al.* (2015), os sistemas de distribuição de dois estágios são um caso especial de sistemas de vários estágios, pois são caracterizados pela ocorrência do transporte indireto, ou seja, pela movimentação de carga por instalações intermediárias antes da chegada ao destino.

Cuda *et al.* (2015) propõem uma classificação dos problemas de distribuição em dois estágios em três categorias, sendo duas de maior interesse nesse trabalho: Problemas de Roteamento de Localização de Dois Estágios (2E-LRPs, do inglês, *two-echelon location routing problems*) e Problemas de Roteamento de Veículos em Dois Estágios (2E-VRPs, do inglês, *two-echelon vehicle routing problems*). Segundo os autores, no 2E-LRP, os satélites e depósitos a serem abertos devem ser selecionados a partir de um conjunto de possíveis localizações e há um custo de abertura associado a cada depósito e cada satélite. E no 2E-VRP,

por sua vez, o conjunto de depósitos e satélites a serem usados é conhecido, então não há custo associado ao uso destas instalações. A **Figura 1** apresenta um sistema de distribuição em dois estágios:

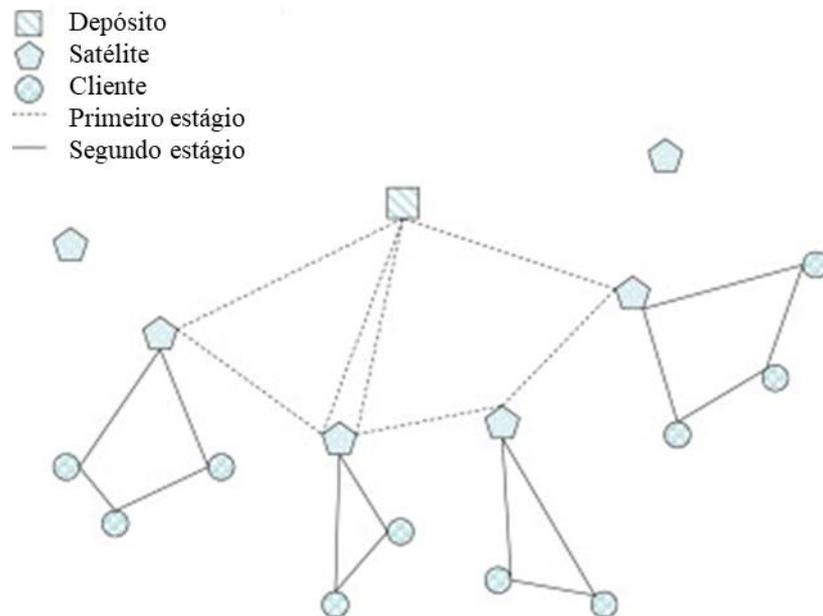


Figura 1: Exemplo de configuração de problema 2E-VRP capacitado (Cuda *et al.*, 2015)

Os trabalhos de Crainic *et al.* (2009) e Perboli *et al.* (2011) foram precursores ao explorar as primeiras formulações e a propor a classe de problema de roteamento de veículos capacitado em dois estágios (2E-VRP). No problema estudado por Perboli *et al.* (2011), há um único depósito e um número fixo de satélites capacitados, com frota homogênea em cada nível, ou seja, com veículos de mesma capacidade fixa em cada nível. Além disso, não há janelas de tempo associadas, e, a demanda, que é fixa e conhecida, deve ser atendida integralmente pelos satélites, de forma que cada cliente deva ser atendido por um único veículo, sem ocorrência de fracionamento. Com isso, busca-se designar o atendimento de cada cliente a um satélite e a um veículo e determinar as quantidades fluindo pelos arcos, considerando o objetivo de minimizar os custos de transporte e de operação nos satélites.

Os estudos sobre sistemas em dois estágios evoluíram na literatura trazendo diferentes formas de resolver variantes deste problema através de otimização. Os modelos de melhor desempenho para problemas 2E-VRP propõem, respectivamente, um método heurístico para solução de problemas de até 10 satélites e 200 clientes (Hemmelmayr *et al.*, 2012), e um

algoritmo exato para solução de problema com até 6 satélites e 100 clientes (Baldacci *et al.*, 2013). Segundo Ansari (2018), para a maioria dos sistemas logísticos realistas, as abordagens exatas tendem a falhar no fornecimento de soluções de alta qualidade dentro de um período de tempo aceitável, e diante disso, os modelos de aproximação contínua acabam tendo uma ampla gama de aplicações em problemas de localização, roteirização e gerenciamento de estoque. Nesse sentido, os capítulos subsequentes da revisão discutem abordagens que explorem o uso de distritos logísticos e de modelos de aproximação.

2.3 Abordagens de Aproximação Contínua e de Distritos Logísticos

Os modelos de aproximação contínua (do inglês, *continuous approximation - CA*) permitem aproximar distâncias de entregas, sem a necessidade de solucionar problemas complexos de roteirização. Diferentemente dos métodos discretos, que visam estabelecer sequências de pontos de demanda visitados por meio de soluções ótimas ou quase ótimas, os métodos baseados em abordagens de aproximação contínua visam derivar compensações de desempenho em nível de sistema com dados limitados e formas analíticas simplificadas (Merchán e Winkenbach, 2019a).

Uma das primeiras abordagens de aproximação contínua, desenvolvida por Daganzo (1984), traz uma formulação para estimar distâncias viajadas por frotas de veículos em problemas de distribuição física, contendo um depósito e uma área de entregas. Esse método se configura como uma variante da abordagem clássica “*cluster-first, route-second*” de problemas de roteamento de veículos. Isso porque a área de entregas é, primeiramente, dividida em distritos contendo agrupamentos de pontos e, posteriormente, rotas de veículos são construídas para servir cada grupo.

Mais especificamente, Daganzo (1984) parte de um distrito de formato quadrado, como o da **Figura 2**, com uma densidade uniforme de pontos de demanda em setores retangulares, e obtém a distância total para atender cada setor retangular. Essa distância total é composta pela distância de *line-haul*, entre o centro de gravidade desse setor e o depósito, e pelas distâncias locais, que corresponde à soma das distâncias para visitar os pontos dentro do setor.

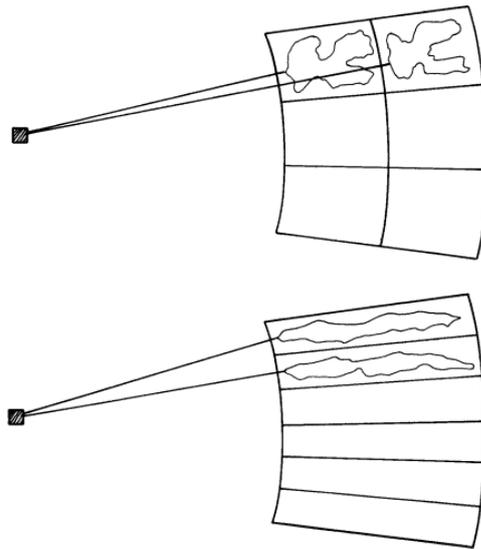


Figura 2: Divisão em distritos de entrega (Daganzo, 1984)

Abaixo, está descrita a fórmula que determina a distância média por ponto de parada em um setor retangular:

$$d^* \cong \emptyset(\delta l^2)/\sqrt{\delta} \quad (1)$$

$$d \cong \left(\frac{2}{c}\right) \left[\rho - \left(\frac{l'}{2}\right)\right] + \emptyset(\delta l^2)/\sqrt{\delta} \quad (2)$$

Sendo:

Se $\rho \leq l'/2$, então $d = d^*$

Onde:

d^* : distância média local por ponto de entrega;

d : distância média por ponto de entrega, considerando componente de distância de *line-haul*;

ρ : distância de *line-haul*;

\emptyset : fator de comprimento do trajeto;

δ : densidade de clientes, ou seja, N/A ;

N : número de pontos localizados em uma região conectada de um plano;

A : área do plano em que os N pontos estão localizados, ou seja, área de entrega;

l : lado menor de um setor de formato retangular;

l' : lado maior de um setor de formato retangular;

C : pontos de entrega no setor retangular de lados l e l' .

As abordagens “*cluster-first, route-second*” revelam que a adoção de divisões de regiões de entrega em distritos traz praticidade para os problemas de distribuição. Nessa linha, os problemas distritais (do inglês, *districting*) auxiliam no tratamento dos problemas. Os problemas distritais, por sua vez, buscam agrupar pequenas áreas geográficas, denominadas unidades básicas, em aglomerados geográficos maiores, denominados distritos, de forma que sejam equilibrados, contíguos e compactos (Kalcsics, 2015).

A partir do trabalho de Daganzo (1984), fica evidente que a definição de distritos para agrupamento dos pontos de entrega influencia na estimativa de distâncias. Além de configurações retangulares, há trabalhos que exploram configurações de distritos em regiões convexas, em padrão de anel radial e em diagramas de Voronoi (Newell, Daganzo, 1986a; Newell, Daganzo, 1986b; Novaes *et al.*, 2000 e Galvão *et al.*, 2006). E mais recentemente, alguns trabalhos aplicados em problemas de distribuição urbana, exploram relações administrativas (Huang *et al.*, 2018 e Pina-Pardo *et al.*, 2022) e segmentação em grade regular, como por exemplo de 1 km² (Merchán *et al.*, 2019b).

Outro aspecto relevante em problemas empregando aproximação contínua é a adoção de considerações de distâncias que reflitam características das vias percorridas nos trajetos. O fator de circuito é uma forma de incorporar essas considerações, consistindo em uma razão entre a distância real (distância em rede) e a distância linear. Foi introduzido no nível de país e de cidade por Love e Morris (1979), Love e Morris (1972), Ballou *et al.* (2002) e Giacomini e Levinson (2015). Já a nível de viagens locais, há poucos estudos que incorporem propriedades heterogêneas das redes urbanas.

O trabalho de Merchán *et al.* (2019b) introduz análises de fatores de circuito locais para redes urbanas, partindo de um estudo de caso para cidade de São Paulo (Brasil). Mais especificamente, uma área urbana de interesse em São Paulo é selecionada e dividida em uma grade de segmentos quadrados de 1 km², e os dados da rede urbana são explorados através de modelos de aprendizado de máquina, tais como análise de componentes principais e análise de agrupamentos (do inglês, *cluster analysis*). As propriedades topológicas e dimensionais da rede envolvem conectividade de nós, grau do nó, grau de vizinhança, centralidade de intermediação, centralidade de proximidade e grau de centralidade. Após constatar heterogeneidade significativa nos segmentos urbanos, como ilustrado na **Figura 3**, uma classificação é proposta, como ilustrado na **Figura 4**, a partir da análise de clusters. Segundo os autores, a classe

“*constrained road network segments*” é composta, principalmente, por segmentos do centro da cidade e por segmentos atravessados por rodovias principais e estradas primárias, ou seja, com maior fração de ruas de mão única e maior comprimento da rodovia e estradas primárias. Já a classe “*fine-grained road network segments*” apresenta formação em torno de segmentos da cidade. E a classe “*coarsed-grained road network segments*” corresponde principalmente a zonas periféricas e áreas com infraestrutura de rede rodoviária limitada ou atípica. Por fim, os autores introduzem um modelo de regressão quadrática que correlaciona essas propriedades ao circuito da rede e estendem as análises para mais sete cidades da América Latina.

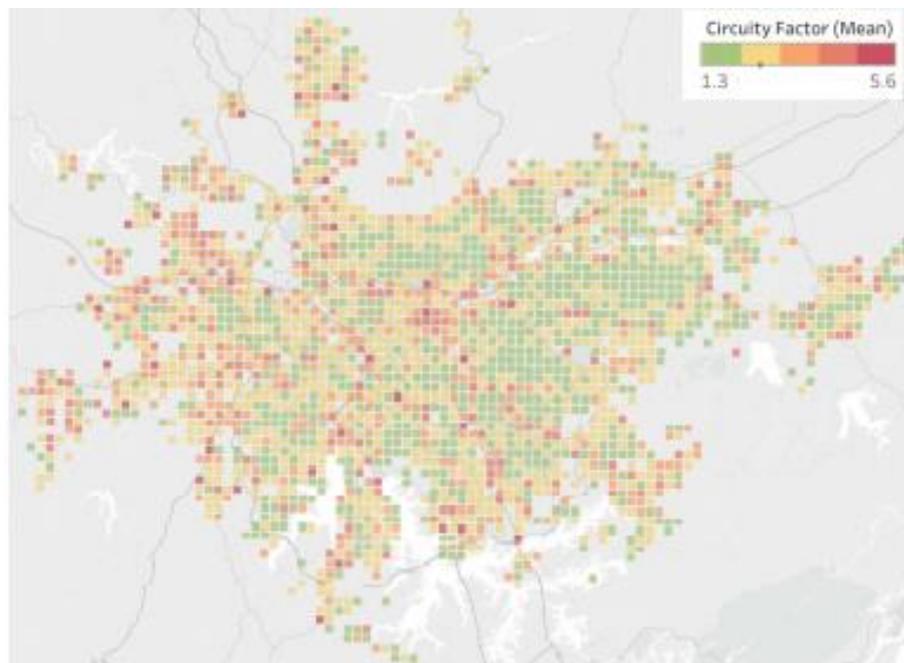


Figura 3: Heterogeneidade de fatores de circuito de rede observados em São Paulo (Merchán *et al.*, 2019b)

O uso de fatores de circuito de viagens locais em aproximações de distâncias de rotas urbanas é validado empiricamente por Merchán *et al.* (2019a). Os autores estendem um método tradicional de aproximação de distância (Beardwood *et al.*, 1959) e exploram novas fontes de dados geoespaciais e dados reais de entrega da Companhia Digital (B2W) na cidade de São Paulo. Além disso, selecionam três segmentos da cidade com diferentes características de rede e analisam o efeito do circuito e do número de pontos de demanda (do inglês, *points of demand* - PODs) na qualidade das aproximações de distância, comparando o modelo proposto com um

2.4 Problemas de Gestão de Frotas com Aplicação de Aproximação Contínua

Os trabalhos seminais sobre frotas em problemas de distribuição exploraram o dimensionamento da frota e o roteamento de veículos. Golden *et al.* (1984) propõem o problema de dimensionamento de frota (do inglês, *Fleet Size*) para encontrar o número de veículos a serem comprados ou alugados para satisfazer as demandas dos clientes na rede, e propõem o problema de roteamento de veículos misto (do inglês, *Mix Vehicle Routing Problem*), voltado para determinações de custos variáveis das rotas, ou seja, de operação dos veículos. Taillard (1999), por sua vez, propõe o problema de roteamento de veículos heterogêneos (do inglês, *Heterogeneous Vehicle Routing Problem*), que trabalha com frota conhecida. Estes trabalhos abriram caminhos para trabalhos que abordam a gestão de frotas de forma operacional.

Tendo em vista o objetivo deste trabalho de explorar decisões táticas de gestão de frotas, tais como tamanho e composição, buscou-se identificar a literatura existente sobre abordagens de aproximação contínua aplicadas à gestão de frotas. Para suportar o estudo, foram pesquisados trabalhos nas bases acadêmicas Scopus e Web of Science, usando as combinações de palavras “*continuous approximation*”, “*fleet size*”, “*fleet composition*” e “*fleet management*”. Após a coleta de 89 artigos, trabalhos de congresso e relatórios publicados até março de 2022, as duplicidades foram removidas e os materiais foram filtrados de acordo com o escopo deste estudo. Isso significa que foram eliminados estudos que não utilizassem aproximação contínua ou que estivessem fora do contexto de transporte urbano de cargas, como por exemplo, trabalhos sobre transporte de passageiros e sobre transporte marítimo. Com isso, verificou-se que a literatura sobre problemas de gestão de frota, usando formulações de aproximação contínua, foi pouco explorada.

Jabali *et al.* (2012) introduzem o primeiro modelo de aproximação contínua para o problema de composição da frota, usando uma topologia radial com setores para definir zonas de veículos e os tipos de veículos atribuídos a elas. Os autores consideram uma densidade de clientes uniforme na região de serviço e cada zona sendo atendida por um único veículo, dentre os tipos disponíveis, que se diferenciam em termos de capacidade, custos fixos e custos variáveis. Os custos de roteamento são avaliados através de um modelo de aproximação contínua e é proposta uma formulação de programação não linear inteira mista. Embora o objetivo do trabalho não compreenda a resolução no nível operacional, os autores sinalizam a

possibilidade de complementar o modelo com a resolução de um problema de roteamento de veículos e gestão do dimensionamento da frota. Nesse sentido, o trabalho foca em propor uma abordagem estratégica para o problema de composição de frota, realizar análises computacionais e de sensibilidade para alguns parâmetros do modelo Composição de Frota com Aproximação Contínua e obter percepções gerenciais sobre as soluções.

Nourinejad e Roorda (2017) estendem o trabalho de Jabali *et al.* (2012) e propõem um problema de composição de frota para redes retangulares, considerando velocidades de veículos homogêneas e heterogêneas. Da mesma forma, adota-se uma densidade de clientes uniforme em uma região de serviço e cada zona alocada a um único veículo. Por fim, o modelo de otimização, voltado para minimização dos custos totais de aquisição da frota e de viagem, é resolvido por aproximação e comparado a uma heurística de geração de colunas. Alguns experimentos computacionais são apresentados para compreensão de desempenho.

Jabali e Erdoğan (2015) estudam um problema de dimensão de frota e roteamento (do inglês, *Fleet Size Routing Problem – FSR*) e propõem um modelo de composição e substituição de frota. Consideram horizonte de tempo multiperíodo finito, região de serviço retangular e frotas homogêneas e heterogêneas. Os custos, que são obtidos por aproximação contínua, envolvem aquisição de veículos, manutenção e roteirização, além de custos de terceirização para situações de clientes não poderem ser atendidos. Por fim, alguns experimentos computacionais são apresentados para compreensão de desempenho.

Franceschetti (2017) abordam um problema estratégico de composição de frota heterogênea em área urbana, propondo a divisão de uma área de serviço retangular em setores, cada um servido por um único veículo. A frota apresenta dois tipos de veículos - elétricos e a diesel, distintos em sua capacidade de transporte (carga máxima) e em seu custo de utilização. O custo de utilização é composto pelo custo fixo - depreciação, no caso de veículos comprados, e aluguel por turno, no caso de veículos alugados - e pelo custo variável, que é proporcional à distância percorrida. O objetivo compreende dividir a área e determinar o tipo de veículo de cada setor, de forma a otimizar a soma dos custos de propriedade ou locação, transporte e mão de obra. Há restrições de tempo de acesso à área de serviço, ou seja, há um tempo máximo que cada tipo de veículo pode trafegar na área. A extensão das rotas é calculada usando aproximação contínua, considerando uma densidade uniforme de clientes dentro da área, e o problema é solucionado como um problema linear inteiro misto e como um programa dinâmico, ou seja,

usando um algoritmo baseado em programação dinâmica. Por fim, os autores mostram como a composição ótima da frota muda dependendo dos parâmetros do veículo e discutem o impacto das restrições de acesso à cidade na composição da frota, como o aumento de congestionamento do tráfego.

Banerjee *et al.* (2022) estudam problemas de delimitação tática, envolvendo dimensionamento de frota e particionamento de uma região de serviço em zonas de roteamento de veículos, em um sistema de serviços de entrega no mesmo dia (do inglês, *Same Day Delivery* - SDD). O sistema opera com uma região de serviço dividida em zonas não sobrepostas, cada uma atendida por um único veículo, e com um único depósito, de onde é despachada uma frota de veículos homogêneos e não capacitados. O processo de chegada de pedidos é aproximado assumindo que a demanda se acumula até um momento de corte, de forma determinística e contínua em toda a região de serviço, a uma taxa constante e geograficamente homogênea. Os autores empregam aproximação contínua para otimização, demonstram como derivar dimensões de frota, a partir de funções de áreas ótimas, e propõem uma abordagem Voronoi para particionar a região de serviço em zonas de veículo único. Por fim, alguns experimentos computacionais são apresentados para compreensão de desempenho.

2.5 Problemas de Gestão de Frotas em Sistemas de Distribuição de Dois Estágios

Com relação ao emprego de aproximação contínua em problemas de gestão de frotas de sistemas de distribuição de dois estágios, nota-se que a literatura é escassa. Para compreensão do estado da arte, foram pesquisados trabalhos nas bases acadêmicas Scopus e Web of Science, usando as combinações de palavras “*two-echelon*”, “*two-echelon distribution system*” e “*two-echelon vehicle routing problem*” com “*fleet size*”, “*fleet composition*” e “*fleet management*”. Após coleta de 47 artigos, trabalhos de congresso e relatórios, publicados até março de 2022, foram filtrados materiais de acordo com o escopo deste estudo. A partir disso, constatou-se que os trabalhos abordam o estudo da frota incorporado aos problemas de definição de roteiros e de localizações, e empregam, geralmente, métodos exatos e heurísticos para resolução.

Alguns trabalhos encontrados contribuem para literatura ao incorporar considerações de frota em problemas operacionais de roteamento, trazendo soluções exatas e heurísticas. Wang e Wen (2020) abordam um problema de otimização de roteamento de veículos de baixo carbono

para uma rede logística de cadeia fria de dois níveis, composta por depósitos, satélites e clientes, considerando janela de tempo e frota heterogênea. Os autores designam como problema LC-2EHVRP (do inglês, *Low-carbon Two-echelon Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem*). Neste estudo, os números de clientes, centros de distribuição, depósitos e capacidades de veículos e depósitos são conhecidos, e as demandas dos clientes, conforme requisitos de tempo, são pré-determinadas. Os autores utilizam um algoritmo genético adaptativo e efetuam experimentos com casos reais, para explorar compensações entre satisfação do cliente, custos econômicos e redução de emissões.

Também na linha de roteamento, Yu *et al.* (2021) abordam uma nova variante do problema em dois estágios, com janelas de tempo e motoristas ocasionais (do inglês, *Two-echelon Routing Problem with Time Windows, Covering Options and Occasional Drivers*, 2E-VRPTW-CO-OD). Os autores consideram dois tipos de frotas para atender os clientes finais - cargueiros urbanos e motoristas ocasionais, e duas opções de cobertura da demanda determinística - entrega em domicílio e entrega em locais para retirada. São propostas uma formulação de programação linear inteira mista (do inglês, *mixed integer linear programming* - MILP) e uma metaheurística para otimização do custo total, que engloba custos de roteamento, custos de conexão e compensações pagas aos motoristas ocasionais. Vale notar que a frota é considerada no problema de roteamento, através de parâmetros, tendo em vista que, no primeiro estágio, os satélites e locais de cobertura são atendidos por caminhões provenientes do depósito, e no segundo estágio, há uma quantidade máxima de cargueiros na cidade e uma limitação na atribuição de cargueiros urbanos a um satélite. Por fim, alguns experimentos computacionais são apresentados para compreensão de desempenho.

Há alguns trabalhos na literatura que abordam frotas de veículos elétricos. Gao *et al.* (2022) usam análise de jogos para avaliar cenários de renovação de frota de um provedor de serviços de logística em uma cadeia de suprimentos de dois níveis. Os cenários são substituir veículos com motor de combustão interna existentes por apenas veículos elétricos ou uma combinação de veículos elétricos e novos veículos com motor de combustão interna.

Breunig *et al.* (2019) formulam um problema estendendo o roteamento de veículos em dois estágios, que envolve veículos elétricos, restrições de capacidade da bateria e possíveis visitas a estações de carregamento. O problema é conhecido como 2E-EVRP (do inglês, *Electric Two-echelon Routing Problem*). Os autores introduzem um algoritmo exato eficiente,

juntamente com uma metaheurística de busca de grande vizinhança adaptativa e simulam as características gerais de uma área metropolitana para examinar o impacto da densidade da rede de estações de recarga e da capacidade das baterias dos veículos na relação custo-benefício das soluções ótimas do problema.

Akbay *et al.* (2022) agregam janelas de tempo ao problema de roteamento de veículos elétricos em dois estágios, também levando em consideração a autonomia limitada de veículos elétricos que precisam ser recarregados em estações de recarga. O problema é designado 2E-EVRP-TW (do inglês, *Electric Two-echelon Routing Problem with Time Windows*). No primeiro estágio, entre o armazém central e os satélites, a frota é composta por veículos grandes com motores de combustão interna, e no segundo estágio, entre satélite e os pontos de demanda, a frota é composta por veículos elétricos. Os autores apresentam uma formulação MILP, resolvida usando o software CPLEX para instâncias de pequeno porte, e também propõem uma heurística construtiva baseada em uma heurística de economia de Clarke e Wright modificada. Depreende-se, portanto, que os estudos de frotas de veículos elétricos dão maior enfoque para as restrições de uso de estações e janelas de tempo, e que a dimensão da frota é considerada no problema de roteamento como parâmetro.

Também há trabalhos que incorporam a dimensão da frota em problemas de localização e roteamento de veículos, explorando soluções exatas e heurísticas para otimização. Dalfard *et al.* (2013) aplicam um algoritmo genético híbrido e recozimento simulado na resolução de um problema de localização-roteamento de dois níveis, em que é necessário determinar a localização e o número de dois tipos de instalações capacitadas, o dimensionamento de duas frotas de veículos diferentes, também capacitadas, e as rotas relacionadas em cada estágio. As capacidades do centro de distribuição central, dos centros de distribuição regionais e da frota de veículos são parâmetros determinísticos e conhecidos, assim como a demanda dos clientes. Assim, observa-se que, neste estudo, a frota é definida junto com roteiros e localizações, garantindo que sejam consideradas limitações de quantidade de veículos podendo partir de um centro regional e de distância máxima percorrida por veículo.

Liu *et al.* (2021) propõem um problema de roteamento de localização de dois níveis com veículos mistos e satélites mistos, composto por um primeiro estágio, com rotas entre depósito e satélites atendidas por van, e por um segundo estágio, em que os clientes podem ser atendidos por robô entregador ou por armários de encomenda. O problema é designado 2E-LRP-MVMS

(do inglês, *Two-echelon Routing Problem with Mixed Vehicles and Mixed Satellites*). Os autores formulam um modelo de otimização de dois objetivos, buscando otimizar as rotas em cada nível e reduzir os custos causados pelas emissões de carbono, e apresentam um algoritmo imunológico híbrido para resolução. Depreende-se, portanto, que neste trabalho, a frota e o uso de armários e de robôs são atribuídos aos arcos, na formação das rotas.

Zhao *et al.* (2018) desenvolvem um modelo de otimização para um problema de roteamento de localizações em dois estágios capacitado (do inglês, *Two-echelon Capacitated Location Routing Problem – 2E-CLRP*), com frota heterogênea e práticas de alianças de entrega conjunta na China. O modelo busca encontrar o tamanho ideal e a localização de depósitos intermediários compartilhados pelo sistema de entrega conjunta, a alocação dos depósitos aos terminais (segmentos da cidade) e as rotas de pequenos veículos heterogêneos. Os autores apresentam um algoritmo heurístico de aproximação cooperativa, baseado em um modelo de aproximação, e aplicam em um estudo de caso para Chongqing, dividindo a área urbana em 421 segmentos (os terminais), de acordo com a estrutura das ruas, e atribuindo distribuições uniformes para a demanda e tempo gasto em cada um desses terminais. Com relação a análises de composições de frota heterogênea e homogênea no último estágio, é constatado que a frota heterogênea é mais eficiente que a homogênea, possibilitando menos viagens de veículos, menor custo total, menor custo unitário de entrega, menores emissões de carbono e maiores taxas de carregamento. Dessa forma, o trabalho contribui para literatura de roteamento de localizações combinado à composição de frota, incorporando entregas conjuntas e considerando importantes restrições práticas, como capacidade de veículos, jornada de trabalho e restrições de tráfego na área urbana.

Winkenbach *et al.* (2016) consideram um problema de roteamento de localizações capacitado em dois estágios, em que buscam determinar o número ideal e a localização das instalações em cada estágio, o tamanho das áreas de serviço das instalações e o dimensionamento e a composição da frota em cada instalação. Além de proporem um modelo de otimização, os autores exploram derivações de expressões de aproximação contínua para encontrar custos de roteamento. Essas expressões levam em conta o roteamento com coleta e entrega simultâneas e restrições de tempo máximo de serviço, de capacidade do veículo e de acesso e posicionamento do veículo. Através de análises de sensibilidade do modelo, e empregando dados e parâmetros de La Poste, os autores avaliam composições ideais de frota,

em função de densidades de paradas, níveis variados de tempo máximo de serviço permitido e números variados de itens de entrega por parada. Com isso, constatam que, tanto a composição da frota, como o projeto da rede com ótimo custo-benefício, depende fortemente das características dos tipos de veículos disponíveis. A principal contribuição teórica é a formulação *Augmented Routing Cost Estimation*.

Pina-Pardo *et al.* (2022) estudam um problema de roteamento e localização em dois estágios (2E-LRP), considerando incerteza de demanda e envolvendo decisões estratégicas de localização de instalações e decisões operacionais de distribuição das mercadorias. Mais especificamente, o problema consiste em determinar os locais onde os centros de distribuição e os pontos de transbordo urbano devem ser instalados em uma rede de entregas de última milha, de forma a minimizar custos totais de instalação e de transporte. Os autores desenvolvem um programa estocástico de dois estágios e realizam extensas análises, combinando um método de aproximação contínua, para estimativa dos custos ótimos de roteamento, e uma técnica de aproximação de média amostral para resolução. Além disso, é proposta a aplicação do modelo em um estudo de caso com mais de 1.300 consumidores de Manhattan (Nova York, Estados Unidos da América). Embora o foco do trabalho não seja a definição da frota, vale observar que a composição e o dimensionamento da frota são incorporados nas formulações de custos e da modelagem de otimização. Para o primeiro nível, é considerada uma frota homogênea, e para o segundo nível, é considerada uma frota heterogênea, com cada ponto de transbordo tendo um conjunto de tipos de veículos disponíveis (por exemplo, vans e bicicletas de carga) para fazer as entregas para os clientes finais. Nesse caso, a região de entregas é dividida em segmentos, a partir de informações de CEPs de Manhattan, e cada segmento de cliente é alocado para ser atendido por um ponto de transbordo usando exatamente um tipo de veículo.

2.6 Problemas sobre Bicicleta de Carga em Operação de Distribuição Urbana

Por fim, buscou-se investigar a literatura voltada para o uso de bicicletas de carga em operações de distribuição urbana, tendo em vista que se pretende adotar frotas heterogêneas no trabalho aqui proposto. Para isso, foram pesquisados trabalhos na base acadêmica Web of Science, usando as combinações de palavras “cargo bike” com “*distribution*”, “*logistic*”, “*supply chain*”, “*routing problem*”, “*fleet size*”, “*fleet composition*” e “*fleet management*”.

Foram coletados 30 artigos, trabalhos de congresso e relatórios, publicado até março de 2022, e foram filtrados materiais de acordo com o escopo deste estudo.

Um dos primeiros trabalhos que estuda o uso de bicicletas de carga na composição da frota e reflexos em emissões é o de Koç *et al.* (2016), que parte de uma representação de cidade e experimentos numéricos. Os autores estudam um problema teórico de localização de depósito, composição da frota e decisões de roteamento, visando investigar os impactos em emissões de veículos desses três componentes inter-relacionados. Para formulação do modelo, é utilizada a representação de uma cidade como um grafo direcionado, contendo nós de depósitos potenciais e de clientes, e com distâncias medidas pela norma L1 (distância Manhattan). Neste problema, são considerados depósitos capacitados com custo de abertura, demandas de clientes conhecidas, três zonas de velocidades fixas na cidade e frota heterogênea ilimitada de veículos, operando com várias capacidades e custos diferentes. Os autores desenvolvem uma nova meta-heurística para resolução por otimização e aplicam em um conjunto de instâncias *benchmark* com até 100 clientes e 10 depósitos potenciais. Além disso, também avaliam o efeito de parâmetros como distribuição de clientes e veículos heterogêneos nos principais indicadores de desempenho, incluindo consumo de combustível, emissões e custos operacionais. Com isso, demonstram que, em um ambiente urbano, o uso de frota heterogênea, ao invés de homogênea, pode trazer redução de custos em até 17%.

Arnold *et al.* (2018) desenvolvem um estudo de caso para cidade de Antuérpia, em que analisam custos operacionais e custos externos para diferentes cenários de distribuição urbana de encomendas, através de simulação e de dados reais de atividades de um provedor de serviços logísticos na Bélgica. O cenário inicial de entregas a domicílio por vans é comparado com três cenários alternativos: um cenário de retirada de encomendas em pontos de retirada; um cenário em que as encomendas são levadas por vans até os pontos de retirada e a partir deles até os clientes finais por meio de bicicletas de carga, e um cenário híbrido combinando entrega de bicicletas e retirada. Para cada cenário, são calculados os custos operacionais e externos - emissão, ruído e congestionamento, e realizada uma análise de sensibilidade para os parâmetros de densidade de demanda, percentual de clientes de autoatendimento e congestionamento dentro da cidade. A simulação das rotas de entrega é feita em duas etapas, iniciando com a etapa de geração de demanda e de definição da localização dos clientes, com base em um conjunto de dados do mundo real. Para isso, a área urbana de Antuérpia (de cerca de 4 km²) é dividida

em uma grade de 100 distritos menores (com 400 m² cada) e a demanda total da cidade por dia é distribuída uniformemente entre os distritos. A segunda etapa de simulação envolve o planejamento das rotas de entrega, com base no problema de roteamento de veículos (VRP), e a resolução através do algoritmo Clark-Wright Savings. Esse planejamento considera limitações de horas de trabalho dos motoristas, capacidade do veículo e fatores de congestionamento para os tempos de viagem. Por fim, os autores constataam que os cenários de retirada e de entregas por bicicletas não se mostram benéficas para todas as partes interessadas, tendo em vista que, no cenário de retirada de encomendas, os custos operacionais de transporte são reduzidos e os custos externos aumentam, enquanto no cenário de entrega de bicicletas, os custos externos são reduzidos os custos dos provedores logísticos aumentam. Portanto, observa-se que este trabalho, assim como o estudo aqui proposto, exploram o objetivo de comparar a eficiência entre cenários diferentes de operação de entrega, usando bicicletas de carga. Por outro lado, este trabalho explora cenários com pontos de retirada e frota homogênea de bicicletas, e emprega um método diferente de resolução.

Assmann *et al.* (2020) propõem um modelo para analisar o impacto de sistemas de bicicletas de carga no volume de tráfego e em emissões, avaliando diferentes estratégias para localização de pontos de transbordo urbano (do inglês, *urban transit point* - UTP) e para configurações de veículos. As distâncias de viagem são obtidas a partir de aproximação contínua e são empregadas divisões distritais em unidades de planejamento urbano de aproximadamente 1km², com distribuição geográfica uniforme de população e de demanda de frete. As configurações de veículos de rede analisadas são: entregas por vans convencionais (diesel); entregas por vans elétricas; entregas por caminhões até UTPs combinadas a entregas por bicicletas de carga dos UTPs até clientes finais; entregas por vans até UTPs combinadas a entregas por bicicletas de carga dos UTPs até clientes finais e entregas por e-vans até UTPs combinadas a entregas por bicicletas de carga dos UTPs até clientes finais. Assim, o trabalho aborda recomendações sobre criação de locais candidatos de UTPs, com foco em subsidiar definições de planejamento urbano. Portanto, observa-se que este trabalho também utiliza aproximação contínua. Por outro lado, este trabalho foca em preocupações de planejamento urbano, como volume de tráfego e emissões, e não em dimensionamento de frota e eficiência operacional do aspecto de custos.

Büttgen *et al.* (2021) estudam um problema de distribuição de dois níveis, visando determinar a melhor localização para um hub na cidade de Innsbruck (Áustria) e a composição da frota de entrega, de forma a minimizar os custos de distribuição e de emissão de CO₂. Para o primeiro estágio, entre o centro de distribuição regional e o *hub*, é avaliada a adoção de uma frota homogênea de vans elétricas, e para o segundo estágio, entre o *hub* e os clientes finais, uma frota de bicicletas elétricas de carga. Além de estudar cenários para localização do hub, os autores comparam o desempenho do sistema de logística urbano de dois estágios com o sistema convencional de entregas por vans convencionais diretamente do centro de distribuição regional aos clientes finais. O modelo considera demanda determinística, capacidade limitada dos veículos, janelas de tempo e tempo de serviço nos locais dos clientes, tempo de serviço necessário para carregar os veículos com as encomendas no depósito e restrições de horário de trabalho dos motoristas. Os autores resolvem o modelo como um problema de roteamento de veículos de várias viagens no ArcGIS Pro e conduzem análises de sensibilidade para examinar variações dos resultados em função dos parâmetros de tempo de serviço, capacidade da bicicleta de carga, tempo de renovação, tempo total máximo por rota e custos fixos e variáveis das bicicletas. Com isso, constatam que o sistema de dois estágios supera o sistema tradicional em termos de custos totais diários de distribuição, com até 30% de economias, e redução anual de emissões de cerca de 96%. Nesse ínterim, observa-se que este trabalho, assim como o estudo aqui proposto, exploram o objetivo de comparar a eficiência entre cenários diferentes de operação de entrega - com estágio único e com dois estágios. Por outro lado, este trabalho considera uma frota homogênea para o segundo estágio, e emprega um método diferente de resolução, ou seja, através do software ArcGIS Pro.

Sardi e Bona (2021) propõem uma abordagem baseada em teoria dos grafos para estudar um sistema logístico com bicicletas de carga em Budapeste. A partir de um modelo geométrico teórico, apresentam o modelo real para distribuição de mercadorias nos shoppings e centros comerciais, empregando uma rede logística em formato radial. Nesse modelo, há um centro de consolidação próximo a um anel externo da cidade, centros comerciais e shoppings centrais concentrados em um anel central e shoppings localizados nas ramificações (raias). Assim, são avaliados cenários de distribuição usando apenas caminhões elétricos e cenários combinando o uso de caminhões elétricos, para o transporte entre o centro de consolidação e os shoppings do anel central, e o uso de bicicletas de carga, para o transporte entre o anel central e os shoppings das raias. Ao invés de considerar um problema de roteamento de veículos (VRP), os autores

usam simulação com o modelo geométrico, tendo em vista que focam em obter dados sobre o número esperado de veículos de entrega, sobre o desempenho e sobre os custos de entrega. Por fim, os autores indicam oportunidades de estudar futuramente como estender o modelo para outras cidades. Sendo assim, o modelo fica direcionado para redes com pontos concentrados de entrega, e não há recomendação para aplicações em problemas com demanda dispersa espacialmente, como ocorre em entregas de mercadorias a domicílio.

2.6 Conclusões da Revisão da Literatura

Através desta revisão bibliográfica, depreende-se que há um corpo de literatura incorporando a caracterização da frota a problemas de definição de roteiros e de localizações, inclusive, investigando o uso de frotas heterogêneas com modos alternativos, como bicicletas de carga (por exemplo, Koç *et al.*, 2016; Arnold *et al.*, 2018; Büttgen *et al.*, 2021). Tanto os trabalhos seminais de gestão de frotas, como grande parte dos trabalhos recentes que abordam sistemas distribuição em dois estágios (por exemplo, Breunig *et al.*, 2019; Wang e Wen, 2020; Yu *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2021; Akbay *et al.*, 2022), empregam métodos exatos e heurísticos para resolução dos roteiros dos veículos.

Em contrapartida, a literatura focando na gestão de frotas de forma tática, com uso de formulações de aproximação contínua, é pouco explorada. Alguns estudos contribuem nessa linha, com a introdução de modelos teóricos que propõem a resolução do problema de composição e dimensionamento frota, de forma desacoplada ao problema operacional de roteiros (Jabali *et al.*, 2012; Nourinejad e Roorda, 2017; Franceschetti, 2017). Ainda assim, há uma carência de estudos que apliquem este tipo de abordagem em problemas de distribuição urbana de grande escala.

Há dois estudos que se aproximam do escopo deste trabalho e, portanto, contribuem para o referencial metodológico. Os trabalhos de Winkenbach *et al.* (2016) e Pina-Pardo *et al.* (2022) propõem extensões para formulações de aproximação contínua e aplicam em problemas de distribuição em grandes cidades. Ambos focam na resolução de ponto de vista estratégico e tático, compreendendo tanto a composição da frota, como as decisões de localização de instalações.

O trabalho aqui proposto, por sua vez, busca contribuir para a literatura com a abordagem tática de composição e dimensionamento de frota em um problema de distribuição urbana de grande escala. A proposta se distingue dos demais trabalhos, tendo em vista que: estuda o dimensionamento de frotas heterogêneas no contexto de roteamento em dois estágios; apresenta uma aplicação com dados reais; conduz uma análise espacial da distribuição da demanda para diferentes formas de divisão distrital e analisa a influência dessas diferentes divisões nos custos de distribuição.

Por fim, a **Tabela 1** sumariza os trabalhos analisados nesta revisão da literatura e compara com o trabalho aqui proposto. A tabela traz as contribuições dos trabalhos revisados e as características que os distinguem deste trabalho. Abaixo são elucidadas as características avaliadas:

- Categoria de problema: indica se o trabalho é focado em roteamento e designação de veículos ou em localização de instalações, bem como se aborda a distribuição em estágio único ou em dois estágios;
- Método: identifica os trabalhos que utilizam aproximação contínua e otimização exata;
- Tipo de abordagem: indica os trabalhos que aplicam soluções a dados reais e a estudos de caso, e os trabalhos que apresentam potencial de aplicação, embora não apresentem estudo de caso;
- Divisão territorial: identifica os trabalhos que usam divisões territoriais para resolver o problema de distribuição, assim como o tipo da divisão usada;
- Dimensionamento ou composição de frota: identifica os trabalhos que resolvem o dimensionamento da frota ou a composição da frota;
- Frota heterogênea: identifica os trabalhos que consideram frotas heterogêneas.

Tabela 1 - Principais contribuições e diferenças dos trabalhos revisados (continua)

Autores	Contribuições	Categoria de problema	Método	Tipo de abordagem	Divisão territorial	Dimensionamento ou composição de frota	Frota heterogênea
Jabali <i>et al.</i> (2012)	Propõem um método teórico usando CA para definir a composição da frota	VRP	Aproximação contínua e otimização	Semi-aplicada	Setores de região circular	Sim	Sim
Nourinejad and Roorda (2017)	Estendem um método teórico de CA para definir a composição da frota e consideram veículos heterogêneas	VRP	Aproximação contínua e otimização	Semi-aplicada	Setores retangulares	Sim	Sim
Jabali and Erdoğan (2015)	Utilizam CA em um problema de composição e substituição de frota, com frotas homogêneas e heterogêneas	FSR	Aproximação contínua	Semi-aplicada	Setores retangulares	Sim	Sim
Franceschetti (2017)	Abordam um problema de composição de frota com veículos elétricos e a diesel e avaliam impactos de restrições de acesso à área de serviço	VRP	Aproximação contínua e otimização	Semi-aplicada	Setores retangulares	Sim	Sim
Banerjee <i>et al.</i> (2022)	Abordam um problema de dimensionamento de frota em um sistema de serviço de entrega no mesmo dia, com particionamento da região de serviço em diagramas de Voronoi	SDD	Aproximação contínua	Semi-aplicada	Voronoi	Sim	Não
Wang and Wen (2020)	Abordam um problema de roteamento de veículos de baixo carbono para uma rede de dois estágios, considerando janelas de tempo e frota heterogênea	LC-2EHVRP	Heurística	Semi-aplicada	Não utiliza	Não	Sim
Yu <i>et al.</i> (2021)	Propõem uma nova variante do problema em dois estágios, com janelas de tempo e motoristas ocasionais	2E-VRPTW-CO-OD	Heurística	Semi-aplicada	Não utiliza	Não	Sim

Tabela 1 - Principais contribuições e diferenças dos trabalhos revisados (continua)

Autores	Contribuições	Categoria de problema	Método	Tipo de abordagem	Divisão territorial	Dimensionamento ou composição de frota	Frota heterogênea
Breunig <i>et al.</i> (2019)	Propõem um problema 2E-VRP, que envolve veículos elétricos e restrições de capacidade de carregamento, considerando características de uma área metropolitana	2E-EVRP	Metaheurística	Semi-aplicado	Não utiliza	Não	Não
Akbay <i>et al.</i> (2022)	Abordam um problema 2E-EVRP-TW, que envolve veículos elétricos e janelas de tempo	2E-EVRP-TW	Heurística	Semi-aplicado	Não utiliza	Não	Sim
Dalfard <i>et al.</i> (2013)	Abordam um problema de localização-roteamento de dois estágios, com dimensionamento de frota	2E-LRP	Heurística	Semi-aplicado	Não utiliza	Sim	Sim
Liu <i>et al.</i> (2021)	Propõem um problema de roteamento de localização de dois estágios, com uso de robô entregador e armários de encomenda	2E-LRP-MVMS	Metaheurística	Semi-aplicado	Não utiliza	Não	Sim
Zhao <i>et al.</i> (2018)	Abordam problema de localizações em dois estágios, com frota heterogênea, práticas de alianças de entrega conjunta e composição de frota	2E-CLRP	Heurística	Aplicado	Segmentos de rede	Sim	Sim
Winkenbach <i>et al.</i> (2016)	Propõem uma formulação CA para resolver um problema de roteamento de localização e de definição de frota heterogênea, e aplicam em um problema de distribuição urbana	2E-CLRP	Aproximação contínua e heurística	Aplicado	Segmentos	Sim	Sim

Tabela 1 - Principais contribuições e diferenças dos trabalhos revisados (continua)

Autores	Contribuições	Categoria de problema	Método	Tipo de abordagem	Divisão territorial	Dimensionamento ou composição de frota	Frota heterogênea
Pina-Pardo <i>et al.</i> (2022)	Propõem um problema de roteamento de localização em dois estágios, considerando incerteza de demanda e decisões de localização de instalações, e aplicam em problema de distribuição urbana	2E-LRP	Aproximação contínua e otimização	Aplicado	Divisão administrativa	Sim	Sim
Koç <i>et al.</i> (2016)	Propõem um problema teórico de localização de depósito, composição da frota e decisões de roteamento, visando investigar os impactos em emissões de veículos	LRP	Metaheurística	Semi-aplicado	Não utiliza	Sim	Sim
Arnold <i>et al.</i> (2018)	Desenvolvem um estudo de caso para resolução de um problema de distribuição com retirada de encomendas e transporte por bicicletas de carga	VRP	Simulação	Aplicado	Segmentos regulares	Não	Não
Assmann <i>et al.</i> (2020)	Propõem um modelo para analisar o impacto de sistemas de bicicletas de carga no volume de tráfego e em emissões, considerando estratégias de localização de UTPs	2E-LRP	Aproximação contínua	Semi-aplicado	Segmentos regulares	Não	Sim
Büttgen <i>et al.</i> (2021)	Abordam um problema de distribuição em dois estágios, visando determinar a melhor localização para um hub e a composição da frota, de forma a minimizar custos de distribuição e de emissões	2E-LRP	Metaheurística	Aplicado	Não utiliza	Sim	Não

Tabela 1 - Principais contribuições e diferenças dos trabalhos revisados

Autores	Contribuições	Categoria de problema	Método	Tipo de abordagem	Divisão territorial	Dimensionamento ou composição de frota	Frota heterogênea
Sardi e Bona (2021)	Propõem um problema de rede logística em formato radial, para distribuição em centros comerciais e shoppings, usando transporte por bicicletas de carga e caminhões elétricos	VRP	Simulação	Aplicado	Não utiliza	Sim	Sim
Aguiar (2024)	Aborda um problema de dimensionamento de frota em distribuição em dois estágios, com frotas heterogêneas e diferentes divisões territoriais	2E-VRP	Aproximação contínua e otimização	Aplicado	Divisão administrativa e segmentos regulares	Sim	Sim

3. MÉTODO

O método descrito nesse trabalho está dividido em quatro partes. Na primeira seção, são discutidos os métodos de análise espacial a serem aplicados, para investigar a homogeneidade da demanda em diferentes tipos de divisão distrital. A segunda seção, por sua vez, apresenta o método que permite incorporar características de redes viárias urbanas no cálculo de aproximação de distâncias de distribuição. Na terceira seção, apresenta-se a formulação de aproximação contínua para obtenção da dimensão média da frota de cada tipo de veículo, e propõe-se a modelagem matemática para determinação da composição otimizada da frota heterogênea. Por fim, a quarta parte descreve a aplicação do estudo de caso, que utiliza dados reais de entregas de um grande varejista brasileiro de comércio eletrônico, na região de São Paulo (SP, Brasil).

3.1. Análise Espacial de Dados

Como já discutido, a divisão da área de serviço é uma das questões exploradas em problemas de dimensionamento e composição de frota. Algumas abordagens da literatura consideram distribuição uniforme de pontos de demanda na área de serviço (ver, por exemplo, Daganzo, 1984). Porém, em problemas reais de distribuição urbana, nem sempre a área de serviço apresenta uma distribuição uniforme. Assim, a metodologia desta pesquisa envolve a investigação da homogeneidade da distribuição de pontos de demanda em uma área de serviço e da sua influência na definição da frota.

A análise espacial dos dados de demanda é conduzida por meio da técnica Análise Exploratória de Dados Espaciais (ESDA, do inglês *Exploratory Spatial Data Analysis*). Para condução da análise em um espaço geográfico de interesse, os dados em estudo devem estar associados a delimitações de áreas menores, contidas nesse determinado espaço. Nesse ínterim, as subdivisões empregadas dentro da área de serviço são de duas naturezas diferentes: a partir da divisão do território em grade de segmentos de tamanho regular, e a partir de delimitações administrativas da cidade de São Paulo. A segmentação em grade regular, por sua vez, considera proporções de 0,25km², 1km², 4km² e 9km², e apresenta como base o método de segmentação de 1 km² de Merchán *et al.* (2019b). Já as delimitações administrativas, em

distritos e setores censitários, são obtidas a partir do Censo Demográfico de 2010, realizado pelo IBGE (IBGE, 2010).

Tendo as subdivisões da região de serviço e os dados de pontos de demanda distribuídos espacialmente, é possível determinar as densidades de pontos de demanda para cada área dentro dessa região. As informações de pontos de demanda na cidade de São Paulo são obtidas a partir dos dados históricos da empresa de comércio eletrônico. Nesse sentido, a análise espacial de dados de áreas pode ser conduzida para as divisões administrativas e para as divisões em grade de segmentos regulares.

A análise espacial permite compreender se existem correlações espaciais entre as áreas, considerando a densidade de demanda como atributo de estudo. Mais especificamente, busca-se identificar se há relações de vizinhança entre áreas que exibem alta densidade de demanda, possibilitando estabelecer agrupamentos de áreas de alta densidade de demanda e encontrar bordas de baixa densidade em seu entorno. Da mesma forma, busca-se identificar se há relações de vizinhança entre áreas que exibem baixa densidade de demanda, que possibilitem estabelecer agrupamentos de regiões de baixa densidade. De modo geral, esses agrupamentos poderiam configurar distritos logísticos com características homogêneas de densidade de pontos de demanda.

A Análise Exploratória de Dados Espaciais (ESDA) é uma vertente da análise espacial de áreas e incorpora a caracterização da dependência espacial, quantificando como valores se correlacionam no espaço (Câmara *et al.*, 2004). As estatísticas espaciais provêm da estatística tradicional e adicionam a consideração do lugar de ocorrência de cada variável observada como uma informação significativa (Câmara *et al.*, 2004; Bailey e Gattrel, 1995; Longley, 1996).

Os três elementos básicos da técnica ESDA compreendem uma matriz de proximidade espacial (W), um vetor de desvios (Z) e um vetor de médias ponderadas (W_z) (Anselin, 1995; Câmara *et al.*, 2004). Para encontrar o vetor de desvios (Z), calcula-se a média global de uma variável para todos os objetos em análise e, em seguida, subtrai-se esse valor médio do valor exibido por cada objeto. Assim, cada objeto apresenta um desvio, e a união desses desvios é colocada no vetor Z . Para encontrar o vetor de médias ponderadas (W_z), calcula-se a diferença entre a média dos desvios nos campos vizinhos e a média global. Isso é efetuado através da multiplicação da matriz de proximidade espacial (W) com linhas normalizadas (onde cada elemento de uma linha i qualquer é dividido pelo número de elementos não nulos da mesma

linha) pelo vetor transposto de desvios. Com isso, cada elemento w_{zi} , exibe o valor médio dos desvios dos vizinhos ao objeto i . Estes elementos básicos permitem gerar classificações, que são visualizadas por meio de ferramentas de visualização de análise exploratória.

O índice de Moran (I), calculado através da **Equação 3**, expressa uma medida geral da associação espacial existente em um conjunto de dados, testando se as áreas conectadas apresentam maior semelhança quanto ao indicador estudado do que o esperado em padrão aleatório (Anselin, 1995). Para valores normalizados, isto é, variando de -1 a +1, os valores próximos de zero expressam a inexistência de autocorrelação espacial significativa entre os valores das áreas e das áreas vizinhas. Valores positivos indicam autocorrelação positiva, ou seja, o valor do atributo de uma área é semelhante aos valores dos seus vizinhos. Valores negativos para o índice, por sua vez, indicam autocorrelação negativa.

$$I = \frac{Z^t W_z}{Z^t Z} \quad (3)$$

Onde:

Z : vetor de desvios;

W_z : vetor de médias ponderadas;

t : expoente que define o vetor transposto.

Além dos índices presentes nas técnicas de ESDA, os dados podem ser apresentados e analisados através do gráfico de espalhamento de Moran e do mapa de espalhamento de Moran (*Box Map*). Segundo Câmara *et al.* (2004), o diagrama de espalhamento de Moran, construído com base nos valores normalizados, permite analisar o comportamento de variabilidade espacial de uma variável com a média de sua vizinhança, construindo um gráfico bidimensional de Z por W_z . Segundo os autores, este gráfico é subdividido em quatro quadrantes, normalmente definidos como quadrantes um, dois, três e quatro.

- Q1 (ou HH, de *High-High*): as zonas desse quadrante exibem um valor superior à média global e apresentam áreas adjacentes com valor médio também superior à média global.
- Q2 (ou LL, de *Low-Low*): as zonas desse quadrante exibem um valor de atributo inferior à média global e, ao mesmo tempo, as áreas adjacentes também apresentam valor médio inferior à média global.

- Q3 (ou LH, de *Low-High*): as zonas desse quadrante exibem um valor de atributo inferior à média global, enquanto as áreas adjacentes exibem valor médio superior à média global.
- Q4 (ou HL, de *High-Low*): as zonas desse quadrante exibem um valor de atributo superior à média global, enquanto as áreas adjacentes exibem valor médio inferior à média global.

Nesse sentido, nos quadrantes Q1 e Q2, observa-se uma autocorrelação espacial positiva. E nos quadrantes Q3 e Q4, observa-se uma autocorrelação espacial negativa, levando em conta a diferença do objeto em análise entre a zona e seus vizinhos. Na **Figura 5**, está ilustrado exemplo do gráfico de espalhamento de Moran.

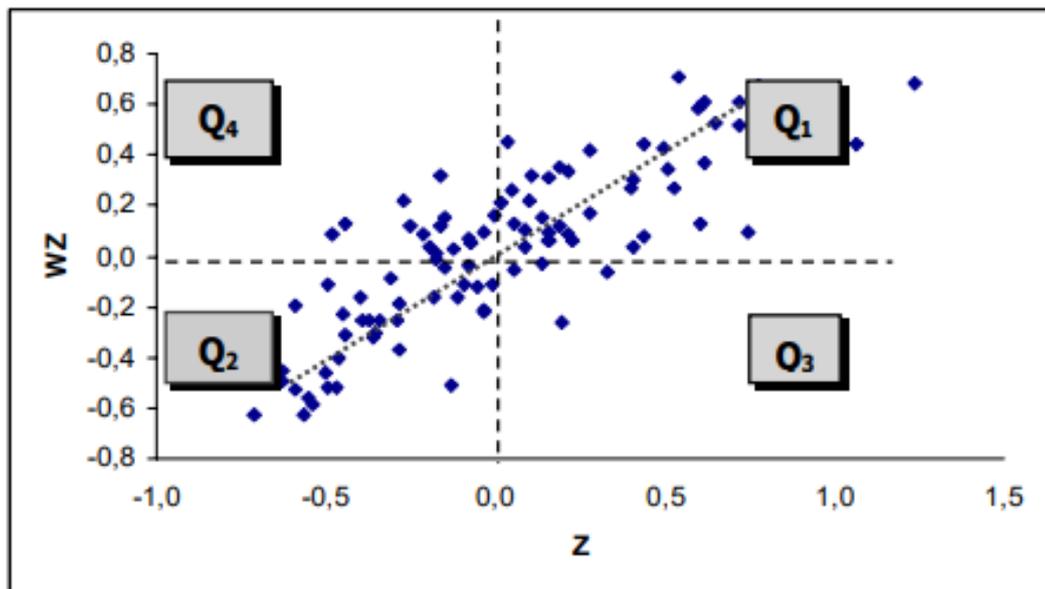


Figura 5: Gráfico de espalhamento de Moran (Câmara *et al.*, 2004)

3.2 Fatores de Circuito em Viagens Locais

A oferta de malha viária influencia as distâncias percorridas pelas frotas na distribuição dentro das cidades. A partir do método de Merchán *et al.* (2019a) e de Merchán *et al.* (2019b), é possível encontrar fatores de circulação que expressam as dificuldades para trafegar localmente e relacioná-los às distâncias percorridas pelas frotas. Neste trabalho, essas formulações são aplicadas para comparar fatores de circulação de frotas motorizadas e não motorizadas. A motivação de analisar modos não-motorizados se deve a tendência de adoção,

por prestadores de serviços, de veículos leves ecologicamente corretos, como as bicicletas cargueiras, em busca de redução de externalidades (Oliveira *et al.*, 2017).

Merchán *et al.* (2019b) introduzem fatores de circuito locais para retratar as especificidades de redes viárias urbanas. Os autores apresentam uma formulação para encontrar os fatores de circuito, partindo da divisão da cidade em segmentos de 1 km², e da geração aleatória de 190 pares de pontos para cada segmento. Para cada par de pontos, encontra-se a distância da viagem em rede e a distância em linha reta. A consideração de 190 viagens para cada segmento é suficiente para encontrar adequadamente o seu fator de circuito, isto é, respeitando níveis de significância estatística. Assim, o fator de circuito expressa o desvio relativo em viagem de um veículo dentro de uma rede, em comparação com a distância em linha reta entre a origem e o destino da viagem. Através das **Equações 4 e 5**, verifica-se que o fator de circuito de cada viagem t é obtido através da razão entre a distância de rede pelo caminho mais curto e a distância euclidiana, e o fator de circuito do segmento de cidade é obtido pela média das viagens t no segmento.

$$\kappa_{it} = \frac{d_N(p,q)}{d_{L2}(p,q)} \quad (4)$$

$$\kappa_i = \sum_{t=1}^T \kappa_{it} / T \quad (5)$$

Onde:

κ_{it} : fator de circuito da viagem entre pontos p e q ;

$d_N(p, q)$: distância do caminho mais curto em rede para viajar entre pontos p e q ;

$d_{L2}(p, q)$: distância euclidiana entre pontos p e q ;

κ_i : fator de circuito do segmento i de 1 km²;

T : total de viagens do segmento i .

Posteriormente, Merchán *et al.* (2019a) propõem uma abordagem para aplicar os fatores de circuito de viagens locais em aproximações de distâncias de rotas urbanas. Estendendo abordagens tradicionais de CA, a distância euclidiana (norma L2) entre paradas é ajustada pelo fator de circuito local. Assim, na **Equação 6**, a constante κ considera a constante da norma L2 e o circuito local. E na **Equação 7**, o cálculo da distância aproximada considera a constante ajustada:

$$\kappa = \kappa_c \kappa_{L2} \quad (6)$$

$$d_c = \frac{\kappa}{\sqrt{\gamma}} \quad (7)$$

Onde:

γ : densidade de pontos de entrega;

κ e κ_{L2} : constantes;

κ_c : fator de circuito local;

d_c : distância de viagem ajustada.

3.3 Modelagem Matemática do Problema e Formulação de Aproximação Contínua

Considera-se uma rede de distribuição de dois níveis, com uma localização satélite e um centro de distribuição, e uma rede de distribuição em nível único, apenas com centro de distribuição. Estes sistemas são mostrados na **Figura 6**. No cenário base de sistema em estágio único, o centro de distribuição representa a origem dos fluxos e atende os distritos logísticos contendo os pontos de demanda (PODs, do inglês, *points of demand*), através de uma frota regular, composta por veículos de grande porte. Já no sistema em dois estágios, o centro de distribuição representa a origem dos fluxos e atende apenas o satélite, usando a frota regular. O satélite é destinado para a entrega de última milha, portanto, cada distrito é atendido pelo satélite e por um tipo de veículo da frota heterogênea. Esta frota heterogênea é composta por veículos de menor capacidade que os veículos do primeiro estágio.

A área de serviço é dividida em distritos logísticos. Neste trabalho, são adotadas diferentes formas de dividir a zona de entrega em distritos logísticos, isto é, usando distritos urbanos administrativos, setores censitários administrativos, segmentos de 1km², segmentos de 0,5km², segmentos de 4km² e segmentos de 9 km². E cada um destes tipos de divisão é avaliado separadamente. Isso significa que, ao empregar a subdivisão em segmentos de 4km², por exemplo, cada segmento de 4km² é um distrito logístico, e ao empregar a subdivisão em distritos urbanos, cada distrito urbano é um distrito logístico. Nesse sentido, a densidade de PODs é calculada para cada distrito logístico, a partir dos dados históricos reais de entrega e da informação de área do distrito. Já a distância de *line-haul*, entre cada distrito logístico e a localização da instalação designada para atendê-lo, é obtida como a distância euclidiana entre o centro de gravidade do distrito e a localização da instalação.

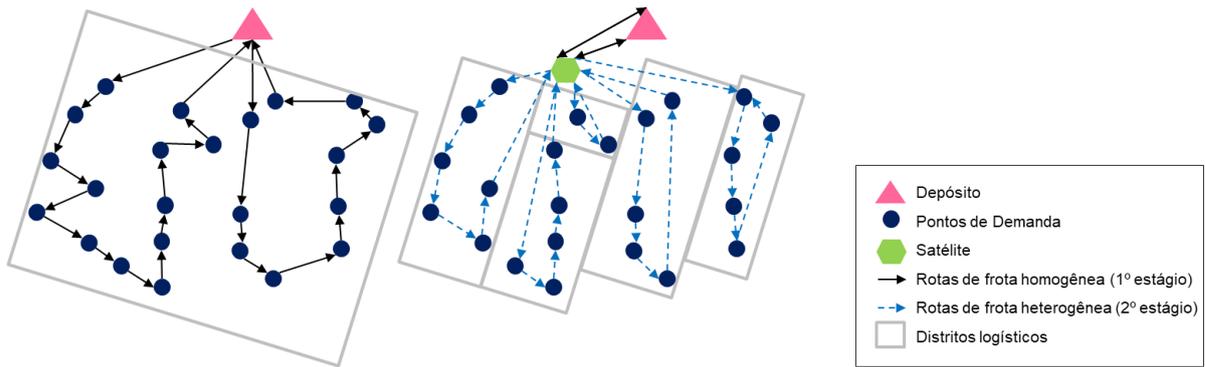


Figura 6: Sistema de distribuição em estágio único, com frota regular e sistema em dois estágios, com frota heterogênea (elaboração própria)

Com relação a caracterização da rede viária, o fator de circuito de modo motorizado e o fator de circuito de modo não-motorizado de cada distrito logístico é obtido pela média dos fatores de circuito associados aos pontos de demanda localizados nesse distrito, de acordo com **Equação 8** a seguir. Isso porque para cada POD, estão associados fatores de circuito de modos de veículos motorizado e não-motorizado, que são correspondentes à caracterização da rede viária no segmento de 1km² em que o POD está inserido.

$$\kappa_k^v = \sum_{n_k} \kappa_{n,i}^v / n_k \quad (8)$$

Onde:

K: conjunto de distritos logísticos;

V: conjunto de tipos de veículos disponíveis para entregar produtos;

κ_k^v : fator de circuito do distrito logístico $k \in K$ para veículo do tipo $v \in V$;

$\kappa_{n,i}^v$: fator de circuito do segmento i de 1 km² em que o cliente n está localizado, para veículo do tipo $v \in V$;

n_k : número de clientes do distrito $k \in K$.

Nesse ínterim, tendo as densidades de demanda, as distâncias de *line-haul* e os fatores de circuito dos distritos logísticos, pode-se obter as distâncias de distribuição por aproximação contínua e o dimensionamento da frota necessária para atender cada distrito logístico, usando tipos de veículos motorizado ou não-motorizado.

O dimensionamento da frota pode ser obtido por meio da formulação *Augmented Routing Cost Estimation* (ARCE), desenvolvida por Winkenbach *et al.* (2016) e abordada por Pina-Pardo *et al.* (2022). Essa formulação, que tem como base métodos tradicionais de aproximação contínua, permite aproximar os custos de roteamento ótimos para atender segmentos de cidade, partindo de instalações satélite. Tendo em vista que, neste trabalho, adota-se uma única instalação satélite, de localização e área total de atendimento conhecidas, a formulação abaixo é apresentada com simplificação para uma instalação.

$$c_k^{v\omega} \approx q_k^{v\omega} m_k^{v\omega} \left[t_v^{\text{prep}} c_v^{\text{wage}} + n_k^{v\omega} \rho_k^\omega t_v^{\text{load}} c_v^{\text{wage}} + \frac{2\delta_k \kappa_v}{\zeta_v^{\text{line}}} (c_v^{\text{wage}} + c_v^{\text{ope}}) + 2\delta_k \kappa_v c_v^{\text{km}} + n_k^{v\omega} \left(t_v^{\text{setup}} + t_v^{\text{serv}} \rho_k^\omega + \frac{\kappa_k^v \kappa_v}{\sqrt{\gamma_k^\omega \zeta_v^{\text{intra}}}} \right) (c_v^{\text{wage}} + c_v^{\text{ope}}) + n_k^{v\omega} \frac{\kappa_k^v \kappa_v}{\sqrt{\gamma_k^\omega}} c_v^{\text{km}} \right] \quad (9)$$

Parâmetros:

$q_k^{v\omega}$: número de veículos do tipo $v \in V$ necessários para atender o distrito logístico $k \in K$, partindo do satélite, no cenário de demanda $\omega \in \Omega$;

$m_k^{v\omega}$: número médio de rotas de veículos necessárias para atender distrito logístico $k \in K$, partindo do satélite, usando veículos do tipo $v \in V$, no cenário de demanda $\omega \in \Omega$;

t_v^{prep} : tempo de preparação necessário para despachar veículos do tipo $v \in V$;

c_v^{wage} : custo salarial por hora de utilização de veículos do tipo $v \in V$;

$n_k^{v\omega}$: número de paradas por rota de veículo do tipo $v \in V$, partindo do satélite, para atender distrito $k \in K$, no cenário de demanda $\omega \in \Omega$;

ρ_k^ω : drop size médio, para um distrito $k \in K$, no cenário de demanda $\omega \in \Omega$;

t_v^{load} : tempo de carregamento fixo exigido por veículos do tipo $v \in V$;

δ_k : distância de *line-haul*, partindo do satélite até o centroide do distrito $k \in K$;

κ_v : fator de circuito para veículos do tipo $v \in V$;

ζ_v^{line} : velocidade de *line-haul* para veículos do tipo $v \in V$;

c_v^{ope} : custo operacional por hora de utilização de veículos do tipo $v \in V$;

c_v^{km} : custo operacional por quilômetro para utilização de veículo do tipo $v \in V$;

t_v^{setup} : tempo fixo de preparação para veículos do tipo $v \in V$;

t_v^{serv} : tempo de atendimento incremental para veículos do tipo $v \in V$;

κ_k^v : fator de circuito local para distrito $k \in K$, para veículos do tipo $v \in V$;

γ_k^ω : densidade média de demanda no distrito $k \in K$, considerando cenário de demanda $\omega \in \Omega$;

ζ_v^{intra} : velocidade entre paradas, considerando veículos do tipo $v \in V$;

n_v^{cap} : capacidade de carga dos veículos do tipo $v \in V$;

A_k : área do distrito $k \in K$;

T_{max} : tempo de serviço máximo.

Alguns parâmetros são calculados da forma a seguir:

- Determinação da capacidade efetiva de um veículo do tipo $v \in V$ para atender um distrito $k \in K$, no cenário de demanda $\omega \in \Omega$, em termos de número médio de clientes:

$$n_k^{\text{cap},v\omega} = \frac{n_v^{\text{cap}}}{\rho_k^\omega} \quad (10)$$

- Determinação do tempo médio de viagem de um veículo do tipo $v \in V$, para atender o distrito $k \in K$, no cenário de demanda $\omega \in \Omega$:

$$\lambda_k^{v\omega} = n_k^{\text{cap},v\omega} \left(t_v^{\text{setup}} + t_v^{\text{serv}} \rho_k^\omega + \frac{\kappa_k^v \kappa_v}{\sqrt{\gamma_k^\omega \zeta_v^{\text{intra}}}} \right) \quad (11)$$

- Determinação do número de viagens com carga completa que um veículo de tipo $v \in V$, consegue fazer, partindo do satélite, no cenário de demanda $\omega \in \Omega$, dentro do tempo de serviço máximo:

$$\beta_k^{v\omega} = \frac{T_{\text{max}}}{\lambda_k^{v\omega} + t_v^{\text{prep}} + n_k^{\text{cap},v\omega} \rho_k^\omega t_v^{\text{load}} + \frac{2\delta_k \kappa_v}{\zeta_v^{\text{line}}}} \quad (12)$$

- Determinação do número de clientes atendidos por rota de um veículo de tipo $v \in V$, partindo do satélite, no cenário de demanda $\omega \in \Omega$:

$$n_k^{v\omega} = n_k^{\text{cap},v\omega} \min\{1, \beta_k^{v\omega}\} \quad (13)$$

- Determinação do número médio de viagens necessárias para atender a demanda de um segmento $k \in K$, com veículo do tipo $v \in V$, no cenário de demanda $\omega \in \Omega$:

$$m_k^{v\omega} = \max\{1, \beta_k^{v\omega}\} \quad (14)$$

- Determinação da dimensão média da frota de veículos do tipo $v \in V$, para atender o segmento $k \in K$, partindo do satélite, no cenário de demanda $\omega \in \Omega$:

$$q_k^{v\omega} = \frac{A_k \gamma_k^\omega}{\beta_k^{v\omega} n_k^{cap, v\omega}} \quad (15)$$

Adicionalmente a formulação ARCE (Winkenbach *et al.*, 2016), o custo de distribuição e o dimensionamento médio da frota de veículos para servir as rotas de primeiro estágio podem ser obtidos pelas **Equações 16 e 17** a seguir. Esse transporte entre o centro de distribuição e o satélite é realizado por um único tipo de veículo, ou seja, por uma frota homogênea.

$$x = \frac{r}{Q} \quad (16)$$

$$C_1 = c \cdot x \quad (17)$$

Onde:

x : número de veículos de primeiro estágio usados para transportar produtos do centro de distribuição para o satélite;

Q : Capacidade de carga dos veículos de primeiro nível;

r : número de produtos enviados do centro de distribuição para o satélite;

c : custo de envio de produtos do centro de distribuição para o satélite;

C_1 : custo de distribuição total do transporte de 1º estágio.

Após obtenção das dimensões médias de frota e dos custos de roteamento para cada tipo de veículo atender cada distrito de entrega, parte-se para a etapa do modelo de otimização. O objetivo do modelo proposto é minimizar o custo total de distribuição, designando para cada distrito logístico o tipo de frota de veículos de segundo estágio que deve atendê-lo. Portanto, o problema de Programação Linear Inteira (do inglês, *integer linear programming* - ILP) busca solucionar a composição da frota heterogênea no segundo estágio.

Com relação às considerações e suposições de modelagem, tem-se:

- O satélite possui um conjunto de tipos de veículos disponíveis para fazer entregas, e é necessário respeitar as quantidades disponíveis de cada tipo;

- Há um centro de distribuição com capacidade para atender o satélite e a região atendida pelo satélite é conhecida, portanto, as capacidades dessas instalações são respeitadas;
- As capacidades dos tipos de veículos são conhecidas;
- A operação de entregas não apresenta o tipo de serviço de entregas com agendamento e, portanto, pode efetuar as entregas em horário comercial, sem atribuição de janelas de tempo;
- A demanda é real, estática e inteiramente atendida;
- A demanda é distribuída espacialmente em cada distrito logístico com densidade homogênea de pontos de demanda (PODs);
- Não se considera arranjo de carga nos veículos;
- Assume-se um *drop size* médio, com tamanho padrão de pacote, que pode ser transportado por todos os tipos de veículos da frota;
- Os veículos operam com carga completa, desde que respeitem a jornada de trabalho permitida;
- Os tempos de carregamento e despacho dos veículos não são considerados na jornada de trabalho da equipe de transporte, pois o pressuposto é que a carga já esteja consolidada e preparada para transporte;
- A operação de distribuição é voltada para entrega de produtos, mas seria possível aplicar em problema de coleta pura de produtos.

Nesse sentido, apresenta-se a formulação do modelo ILP, que é resolvido para cada cenário de demanda $\omega \in \Omega$. Há um satélite, designado para atender um conjunto de K distritos de entrega, que pode ser servido por um conjunto V de tipos diferentes de veículos de segundo estágio.

Parâmetros:

ω : cenário de demanda adotado;

c_k^v : custo de atendimento da demanda do distrito de clientes $k \in K$, servido pelo satélite, utilizando veículos do tipo $v \in V$;

q_k^v : dimensionamento médio da frota de veículos do tipo $v \in V$, para atender o distrito $k \in K$, partindo do satélite;

p^v : quantidade de veículos do tipo $v \in V$, disponível no satélite, para atendimento dos distritos servidos pelo satélite.

Variáveis de decisão:

S_k^v : 1, se o distrito de clientes $k \in K$ é atendido pelo veículo do tipo $v \in V$, e 0, caso contrário.

Modelo:

$$\text{Minimizar } C_2 = \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} c_k^v \cdot S_k^v \quad (18)$$

Sujeito a:

$$\sum_{v \in V} S_k^v = 1, \forall k \in K, \quad (19)$$

$$\sum_{k \in K} S_k^v \cdot q_k^v \leq p^v, \forall v \in V, \quad (20)$$

$$S_k^v \in \{0,1\}, \forall k \in K, v \in V, \quad (21)$$

A função objetivo da **Equação 18** consiste em minimizar o custo de distribuição no segundo estágio (C_2). As restrições compreendem: a **Equação 19** força cada segmento de cliente a ser atendido apenas por um tipo de veículo; a **Equação 20** garante que a quantidade de veículos de cada tipo, disponível no satélite, seja respeitada e, por fim, a **Equação 21** define o espaço de solução das variáveis, com definições de variáveis inteiras e binárias. Vale observar que esse modelo é similar a formulação conhecida na literatura como o Problema de Designação Generalizada, que faz a designação ótima de n tarefas a m agentes (Arenales *et al.* 2011).

3.4 Estudo de Caso

O estudo de caso é desenvolvido para cidade de São Paulo (SP), por meio do uso de dados de distribuição de um grande varejista de comércio eletrônico. Para elucidação do procedimento executado, este item é dividido em quatro subseções. A primeira subseção descreve o procedimento de obtenção dos fatores de circuito locais a serem usados nos cálculos de aproximação, considerando a rede de veículos motorizados e não motorizados em uma região da cidade de São Paulo. A segunda subseção, por sua vez, consiste na busca de relações de homogeneidade dos dados de demanda análise espacial dos dados de demanda de uma região de serviço em São Paulo, a qual abrange uma área de aproximadamente 150km². A terceira subseção descreve a aplicação da abordagem de aproximação contínua e do modelo ILP, para essa mesma região de serviço, com intuito de analisar a sensibilidade da dimensão e da

composição da frota, considerando cenários de uso de distritos logísticos variáveis e de uso de veículos diferentes (frota heterogênea). E a última subseção apresenta o fluxograma das etapas.

As ferramentas utilizadas compreendem: as bibliotecas em Python OSMnx (Boeing, 2017), Geopandas (Jordahl *et al.*, 2020), NetworkX (Hagberg *et al.*, 2008) e Shapely (Gillies *et al.*, 2007), para obtenção dos fatores de circuito e caracterização dos distritos de entrega; o sistema de informações geográficas Maptitude (SIG) e o GeoDa (Anselin, 2005), para subsidiar análises espaciais, e a biblioteca em Python Gurobi (Gurobi Optimization, 2023), para resolução do modelo ILP.

3.4.1 Obtenção dos Fatores de Circuito Locais da Rede Viária

O procedimento a seguir compreende as etapas percorridas para obtenção de informações de circulação local, que traduzam características da rede viária na área de serviço estudada. Com isso, busca-se investigar a pergunta de pesquisa sobre como os fatores de circuito locais para modos de veículos motorizados e não-motorizados se comportam. Mais especificamente, pretende-se avaliar o quanto a oferta de malha viária influencia as distâncias viajadas pelos tipos de frotas motorizadas e não motorizadas.

De modo geral, os fatores de circuito são gerados para segmentos de 1km² da cidade de São Paulo (SP) e, a posteriori, a geração desta grade permite associar estes fatores de circuito aos pontos de demanda real. Isso porque cada ponto de demanda estará contido em um segmento de cidade de 1km². Como resultado do procedimento, as informações espaciais das áreas de 1km² e as informações numéricas de fatores de circuito são transportadas para um arquivo de formato Shapefile (*shp*). Esse formato de arquivo é compatível com softwares SIG. Com isso, é possível gerar mapas temáticos, para representação dos segmentos de cidade, e a distribuição espacial de fatores de circuito de veículos motorizados e de bicicletas.

Para geração das informações de fator de circuito local, são utilizados os pacotes OSMnx, Geopandas, NetworkX e Shapely, em Python. A biblioteca OSMnx (Boeing, 2017), por sua vez, permite obter informações da rede viária, partindo da base Open Street Map (OSM) (The OpenStreetMap Foundation, 2022), que é uma base aberta e colaborativa de mapas digitais. O Geopandas agrega vários pacotes, para atender a necessidades específicas de processamento, análise e visualização de dados geoespaciais (Jordahl *et al.*, 2020). A biblioteca Shapely permite

criar objetos geométricos e espaciais, como pontos, curvas e polígonos (Gillies *et al.*, 2007). E o pacote NetworkX permite a criação, manipulação e estudo da estrutura, dinâmica e funções de redes complexa (Hagberg *et al.*, 2008). Vale destacar que a base Open Street Maps foi selecionada como única fonte para informações de rede, devido a disponibilização gratuita e a razoabilidade do tempo de processamento.

O primeiro passo consiste na definição da grade de segmentos de 1km² para região de interesse da cidade de São Paulo. Partindo da seleção de um ponto extremo ao norte e a leste da área de interesse da cidade e de um ponto extremo ao sul e oeste, é possível encontrar as quantidades de linhas e de colunas da grade. No caso desta pesquisa, a grade é estabelecida em uma região de 525km², de forma que compreenda a área de serviço geralmente atendida por um dos depósitos satélites da empresa de comércio eletrônico. A região é definida por pontos extremos Norte-Leste (-23,504320, -46,516733) e Sul-Oeste (-23,693177, -46,761637). Utilizando as conversões de distância de 1km para 0,008993203 graus de latitude e 0,00979618 graus de longitude, encontra-se uma grade de 21 linhas e 25 colunas. Isso significa o segmento de 1km² no extremo nordeste e o segmento de 1km² no extremo sudoeste apresentam, respectivamente, os centroides: -23,508817, -46,521631 e -23,688680, -46,756739. Tendo os vértices de cada segmento da grade, é possível gerar polígonos em um arquivo geográfico do tipo Shape File (*shp*), através das bibliotecas Geopandas (Jordahl *et al.*, 2020) e Shapely (Gillies *et al.*, 2007).

O segundo passo consiste na geração do grafo direcionado para cada segmento de 1km² da cidade de São Paulo (SP), através da biblioteca OSMnx. Partindo das informações de latitude e longitude de um ponto de interesse, é possível obter as informações de nós e arestas do grafo contido em uma caixa delimitadora centrada no ponto de interesse, considerando uma determinada distância à direita, à esquerda, a norte e a sul deste ponto. Para este trabalho, são considerados tipos de rede de veículos motorizados e não-motorizados, ou seja, “drive”, “bike” e “walk”. A **Figura 7** apresenta um exemplo de segmento de 1km² em torno do cruzamento da Avenida Rebouças e Avenida Brasil.

Em seguida, é necessário simular pontos aleatórios de pares de viagem. A simulação de localizações de pontos de entrega traz praticidade ao tratamento do problema, tendo em vista que elimina a necessidade de gerar os fatores de circuito de forma recorrente, em função de dados reais de demanda. Além disso, muitas vezes, não é possível obter informações de forma

desagregada a nível de pontos de demanda, mas apenas de densidades de entregas. Para garantir uma caracterização satisfatória do segmento, adota-se um cenário de 190 pares de pontos de viagem (Merchán *et al.*, 2019a). Dessa forma, os pares de pontos são gerados nos nós do grafo contido no segmento de 1km², de forma aleatória.

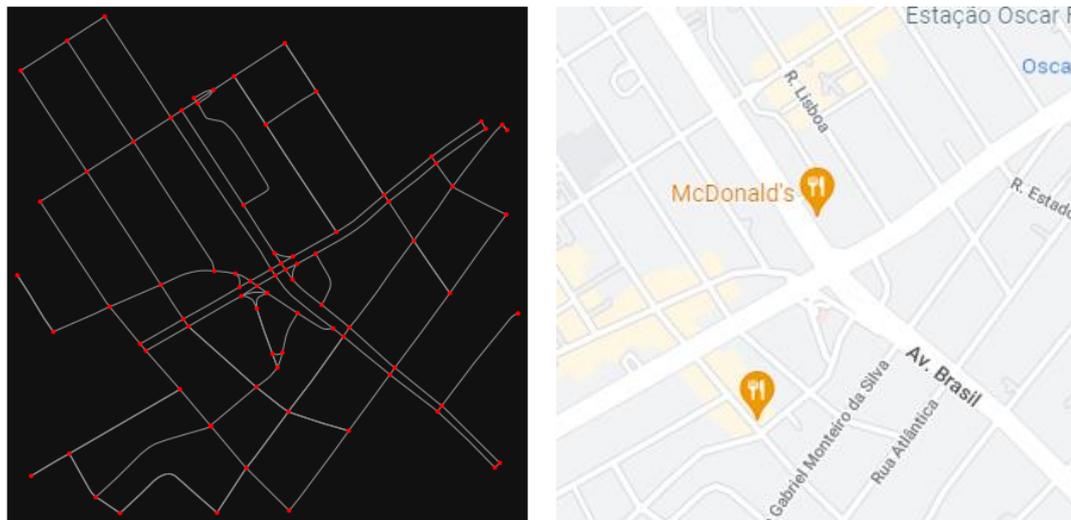


Figura 7: Cruzamento da Avenida Rebouças e Avenida Brasil. (1) Representação de segmento de 1km² gerado através do OSMnx (Boeing, 2017); (2) Representação pela interface do Google Maps (Google Maps, 2022)

Na sequência, as distâncias euclidianas e em rede são calculadas para cada par de pontos. Essas distâncias são encontradas, através de funções dos pacotes OSMnx e NetworkX. A distância euclidiana é calculada a partir das informações de latitude e longitude dos pontos, através de uma função da biblioteca OSMnx (Boeing, 2017), que emprega a fórmula de *Haversine*. A fórmula de *Haversine* permite calcular a distância entre dois pontos em uma superfície esférica (Robusto, 1957). E a distância em rede, por sua vez, é calculada para o caminho mais curto, que é obtido por função da biblioteca NetworkX (Hagberg *et al.*, 2008), que emprega o algoritmo *dijkstra* (Dijkstra, 1959) como método. Vale notar que o caminho mais curto é adotado para cálculo da distância em rede, pois os roteiros de entrega, geralmente, são programados para minimização de distâncias percorridas.

Com isso, calcula-se o fator de circuito para cada viagem e o fator de circuito de cada segmento. Através das **Equações 4 e 5**, descritas neste método, o fator de circuito de um

segmento de 1km² é obtido pela média dos fatores de circuito das viagens dos pares, gerados no segmento. Introduzindo uma estrutura de repetição, é possível aplicar este procedimento para cada segmento da grade e, portanto, gerar os fatores de circuito de cada um dos 525 segmentos, considerando modos de veículos motorizados e não motorizados.

3.4.2 Aplicação de Análise Espacial aos Dados de Densidades de Demanda

Nesta etapa da pesquisa, é conduzida uma análise dos dados de demanda. Primeiramente, os dados de pontos de demanda, para o período de 2015, são explorados através de estatísticas descritivas. As médias e desvios padrões das quantidades de PODs diárias são avaliados, considerando dados de operação de segundas às sextas-feiras, e de segundas a sábados.

Com isso, são selecionados três cenários para estudo:

- Dia com demanda média: seleciona-se um dia da base, que tenha quantidade de PODs até 5% acima ou abaixo da média diária, considerando operação de segundas às sextas-feiras, e da média diária, considerando operação de segundas a sábados;
- Dia com alta demanda: seleciona-se um dia da base, que tenha uma quantidade de PODs até 5% acima ou abaixo do valor obtido pela soma de 1 desvio padrão à média diária, considerando operação de segundas às sextas-feiras, e do valor obtido pela soma de 1 desvio padrão à média diária, considerando operação de segundas a sábados;
- Dia com baixa demanda: seleciona-se um dia da base, que tenha quantidade de PODs até 5% acima ou abaixo do valor obtido pela subtração de 1 desvio padrão da média diária, considerando operação de segundas às sextas-feiras, e do valor obtido pela subtração de 1 desvio padrão da média diária, considerando operação de segundas a sábados.

O varejista atende todo município de São Paulo, podendo operar seis satélites na cidade, além de um único centro de distribuição localizado na periferia da cidade. Embora os dados de demanda estejam disponíveis para o município de São Paulo, o escopo da pesquisa compreende o estudo de uma área com delimitação conhecida, que geralmente é servida por um dos satélites, também de localização conhecida. Nesse sentido, é escolhido um território de atendimento de um satélite localizado em uma região mais central da cidade, com aproximadamente 150km² de área. Essa região de entregas está contida dentro das delimitações da grade de fator de

circuito (FC) de 525km², que é utilizada para estudo da rede viária. Assim, essas áreas e as localizações das instalações são representadas na **Figura 8**.

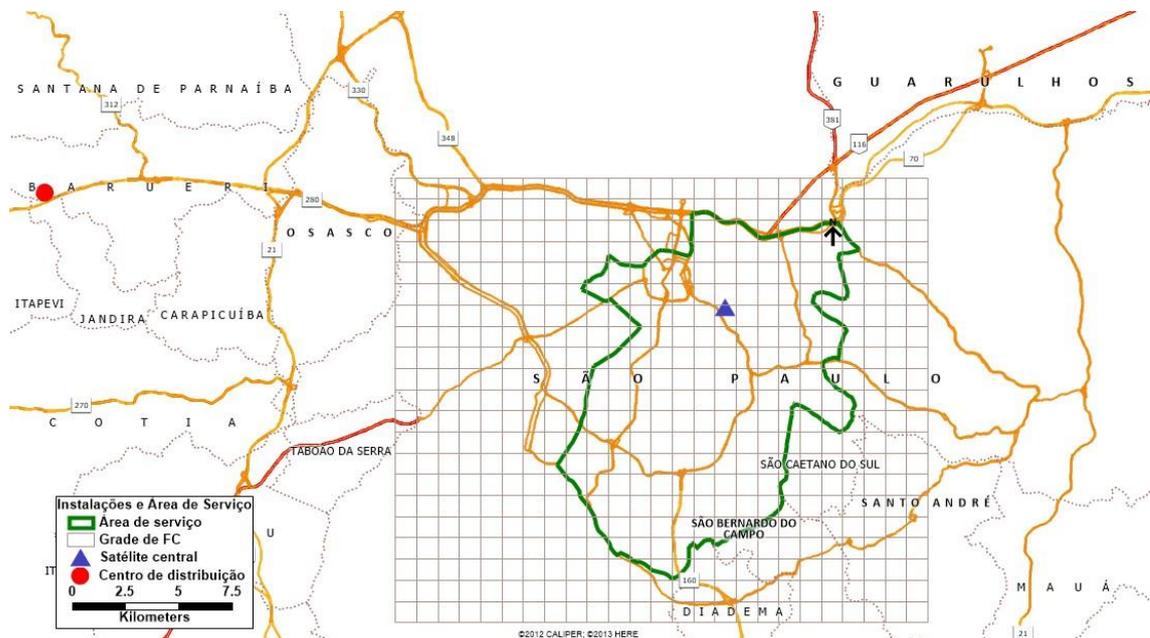


Figura 8: Área de serviço na cidade de São Paulo (elaboração própria)

A escolha dessa área leva em consideração os fatores a seguir: i) a área geralmente atendida pelo satélite central concentra parcela relevante dos pontos de demanda; ii) a área apresenta alta densidade de pontos de demanda - acima de 15 clientes/km², o que permite melhor desempenho em aproximações de distâncias (Merchán e Winkenbach, 2019a).

Para o estudo exploratório dos dados, recorre-se a ferramentas disponíveis no SIG Maptitude e no software GeoDa (Anselin, 2005). Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são sistemas de suporte à decisão, que envolvem a integração de dados espacialmente referenciados em um ambiente de solução de problemas (Cowen, 1988). Esses sistemas apresentam as aplicações: base de dados de pontos, cujos registros são localizados espacialmente, através de informações de longitude e latitude; base de dados de áreas e base de dados de linhas. Quanto a ferramentas, permitem a representação de mapas temáticos, o estudo de redes, o gerenciamento de dados alfanuméricos e o uso de análise espacial. Portanto, são sistemas que permitem armazenar, recuperar, manipular e visualizar os dados estudados, por meio de algoritmos de manipulação e análise, e, portanto, modelar e simular situações complexas (Câmara, 1996).

Para a manipulação dos dados em estudo, as informações de demanda são transportadas para uma base de dados do SIG, a qual estabelece uma correlação entre os dados de demanda com a sua localização no mapa da cidade de São Paulo. As informações de demanda dos três cenários de interesse são transportadas, ou seja, de demanda média, de demanda alta e de demanda baixa.

Além disso, também é necessário importar para o SIG as bases de áreas das grades de segmentos regulares e as bases de áreas administrativas. A base de segmentos de 1km² é a mesma utilizada para obtenção de fatores de circuito da rede viária neste trabalho. E as grades de segmentos de 0,25km², 4km² e 9km² são geradas partindo do mesmo ponto extremo da grade de 1km², com intuito de garantir similaridades nas delimitações. Por exemplo, um segmento da grade de 4km² apresenta a delimitação de quatro segmentos agrupados da grade de 1km². Com relação a divisões administrativas, são usadas bases de setores censitários e de distritos urbanos de São Paulo (IBGE, 2010). Vale observar que estas delimitações administrativas na área de entregas, obtidas do Censo Demográfico de 2010, não demonstram diferenças relevantes em delimitações e proporções de tamanho, em comparação às informações mais recentemente divulgadas pelo Censo de 2021 (IBGE, 2021).

Para possibilitar a condução da análise espacial de dados de áreas, é necessário localizar a região atendida pelo satélite central e calcular a densidade de PODs para cada tipo de subdivisão de áreas, através de ferramentas de *overlays* do SIG. A densidade de PODs de cada setor censitário, por exemplo, é obtida pela divisão da quantidade de PODs diária pela informação de área de cada setor censitário. Isso também é realizado para os distritos urbanos, segmentos de 1km², segmentos de 0,25km², segmentos de 4km² e segmentos de 9km². Vale destacar que a análise espacial é conduzida separadamente para cada um dos tipos de divisão administrativa e para cada grade de segmentos de tamanho regular.

Sendo assim, as densidades são encontradas para os três dias de cenários de demanda e para as seis formas de divisão da área de serviço. Portanto, os dezoito atributos da **Tabela 2** são explorados.

Sucedese, na sequência, a aplicação dos dados à Análise Exploratória de Dados Espaciais (ESDA). Para a criação de matrizes de proximidade espacial, são gerados seis arquivos ESRI Shape com os dados da base, sendo um para cada tipo de divisão de áreas. Esses arquivos devem ser combinados com arquivos do tipo *GAL*, dentro do software GeoDa. É válido observar que

a matriz de proximidade espacial pode ser desenvolvida por meio de duas alternativas relacionadas à condição de vizinhança: *Rook* ou *Queen*. Nesse estudo, consideraram-se os valores produzidos pela opção *Queen*.

Tabela 2 – Cenários para análise espacial das densidades de demanda

Divisão territorial	Cenário de demanda
Setores censitários	Média demanda
Setores censitários	Baixa demanda
Setores censitários	Alta demanda
Distritos urbanos	Média demanda
Distritos urbanos	Baixa demanda
Distritos urbanos	Alta demanda
Segmentos de 1km ²	Média demanda
Segmentos de 1km ²	Baixa demanda
Segmentos de 1km ²	Alta demanda
Segmentos de 0,25km ²	Média demanda
Segmentos de 0,25km ²	Baixa demanda
Segmentos de 0,25km ²	Alta demanda
Segmentos de 4km ²	Média demanda
Segmentos de 4km ²	Baixa demanda
Segmentos de 4km ²	Alta demanda
Segmentos de 9km ²	Média demanda
Segmentos de 9km ²	Baixa demanda
Segmentos de 9km ²	Alta demanda

Com a elaboração dos gráficos de espalhamento de Moran, considerando o atributo de densidade de PODs de cada dia estudado, são obtidos: o índice de Moran (I), o vetor de desvios (Z) e o vetor de médias ponderadas (Wz). Esses vetores, por sua vez, são salvos no arquivo Shapefile e importados para a base de dados do SIG, através de ferramentas de vista conjunta.

Os valores do vetor de desvios (Z) e do vetor de médias ponderadas (Wz) para uma variável em estudo, como a densidade de PODs nas unidades territoriais, podem ser negativos ou positivos. Levando em conta que o elemento z_i representa o desvio entre a média global e o valor da variável para uma determinada unidade territorial e, o elemento w_{zi} contém um valor correspondente ao desvio entre essa média global e a média dos vizinhos da unidade territorial, pode-se inferir que as unidades territoriais com valores positivos para z_i e w_{zi} apresentam densidade de PODs maiores em comparação à média global, bem como as áreas adjacentes a elas.

Nessa perspectiva, as unidades territoriais com valores negativos para z_i e w_{zi} possuem densidade de PODs inferiores à média global e vizinhas com um cenário semelhante. Outro panorama visualizado é de localidades com z_i negativo e w_{zi} positivo, o que traduz a existência de baixa densidade de PODs da unidade territorial e de áreas adjacentes com densidades de PODs altas. Em oposição, há unidades com z_i positivo e w_{zi} negativo, o que determina a existência de alta densidade de PODs nessas locais e baixa densidade em seus vizinhos.

Nesse ínterim, através de ferramentas de seleção do SIG, as unidades territoriais são distribuídas em quatro quadrantes, Q1 (ou HH), Q2 (ou LL), Q3 (ou LH) e Q4 (ou HL). Seguindo esse procedimento, através das ferramentas de seleção do GIS, os setores censitários, os distritos urbanos e os segmentos de tamanho regular são distribuídos em quatro quadrantes, Q1 (ou HH), Q2 (ou LL), Q3 (ou LH) e Q4 (ou HL). Para cada variável, enumerada anteriormente, realiza-se o estudo exploratório descrito e gera-se um mapa temático caracterizando os territórios de acordo com os quadrantes.

3.4.3 Aplicação do Modelo Envolvendo Aproximação Contínua e Programação Linear Inteira

Nesta etapa da pesquisa, são conduzidas as análises exploratórias de dimensão e composição da frota, com uso de aproximação de distâncias e de um modelo de programação linear inteira. Com isso, pretende-se investigar as perguntas de pesquisa: como a adoção de distritos logísticos variáveis na área de atendimento do satélite influencia no dimensionamento da frota e nos custos de distribuição? Quais os impactos nos custos de transporte, entre adotar configuração de distribuição em dois estágios e sistema de distribuição direta?

As análises são realizadas para seis tipos de divisões distritais e comparadas com a delimitação da área de serviço inteiramente atendida pelo satélite. As divisões em distritos urbanos e em setores censitários correspondem a divisões administrativas, e são obtidas através de bases do IBGE (IBGE, 2010). A divisão em segmentos de 1km^2 é obtida com base no método de Merchán (2019b). E as divisões em segmentos de 4km^2 , $0,25\text{km}^2$ e 9km^2 são propostas para avaliar a sensibilidade das proporções dos segmentos regulares. Vale observar que os segmentos maiores, isto é, de 9km^2 , apresentam dimensão próxima da dimensão média dos distritos urbanos da área de serviço, que apresentam em torno de 7km^2 . Já os setores censitários

exibem dimensões bastante variáveis, tendo como média 0,04km² na área de serviço. Esses tipos de divisões são comparados em três cenários diferentes de demanda, ou seja, de alta, média e baixa demanda.

Como são investigadas diferentes divisões distritais, é necessário encontrar, através de ferramentas de *overlays* do SIG, alguns parâmetros que caracterizem cada setor censitário, cada distrito administrativo e cada segmento regular, a saber: o *drop size* médio, o fator de circuito médio para veículos motorizados e o fator de circuito médio para veículos não motorizados.

Primeiramente, é necessário encontrar os fatores de circuito associados aos PODs, para posteriormente, determinar os fatores de circuito médios das áreas distritais. A partir da grade de segmentos de 1km², com seus respectivos fatores de circuito motorizado e não-motorizado, é possível determinar o segmento de localização de cada POD e, portanto, assumir os fatores desse segmento como fatores de circuito associados ao POD. Com isso, é possível obter os fatores de circuito dos setores censitários, dos distritos urbanos administrativos e dos segmentos regulares, de acordo com a **Equação 8**. No caso dos segmentos de 1km², não é necessário calcular fatores médios, uma vez que a grade de segmentos é a mesma utilizada para obtenção dos fatores de circuito.

Na sequência, determina-se a distância do percurso de *line-haul* do centro de distribuição, situado fora da cidade, até a área de serviço total. Essa informação é usada para dimensionamento da frota no cenário de distribuição em estágio único. Como a localização do centro de distribuição é conhecida, calcula-se a distância euclidiana entre essa localização e o centroide da área de serviço total. Para obtenção do centroide da área de serviço total, é necessário: criar o polígono de área no SIG, através de ferramenta de definição de *buffers*; exportar as informações para um arquivo Shape File e, por fim, calcular o centroide, por meio de funções da biblioteca Shapely em Python (Gillies *et al.*, 2007).

Já no caso da distribuição em dois estágios, determina-se a distância do percurso de *line-haul* para cada distrito logístico. A distância de *line-haul* de cada distrito logístico é considerada como a distância euclidiana do centroide do distrito logístico - seja ele um segmento regular, um setor censitário ou um distrito administrativo, até o depósito satélite. As localizações dos centroides são obtidas a partir da exportação de arquivos Shape File do SIG, e do uso de formulações das bibliotecas Geopandas (Jordahl *et al.*, 2020) e Shapely (Gillies *et al.*, 2007). Uma vez obtidos os centroides, calcula-se a distância euclidiana entre eles e a localização do depósito satélite.

Após obtenção dos parâmetros dos distritos logísticos, são levantados os parâmetros operacionais das frotas de caminhões, vans e bicicletas. Levando em conta que as informações das frotas operadas pela empresa de comércio eletrônico em São Paulo não foram disponibilizadas, busca-se como alternativa a adoção de modelos de custos e de tabelas de frete, em complemento a informações da literatura. Estes parâmetros estão representados na **Tabela 2** abaixo e são considerados nas formulações de aproximações, descritas nas **Equações 10 a 18**.

Tabela 3 - Parâmetros considerados para os tipos de veículos

Parâmetro	Caminhão semi-leve	Caminhão leve	Caminhão médio	Van	Bicicleta	Unidade de medida
n_v^{cap}	225	300	450	50	15	Quantidade de pacotes
t_v^{setup}	0	0	0	0	0	Horas
t_v^{serv}	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	Horas
ζ_v^{intra}	12	12	12	15	7	Km/h
T_{max}	8	8	8	8	8	Horas
t_v^{prep}	0	0	0	0	0	Horas
t_v^{load}	0	0	0	0	0	Horas
ζ_v^{line}	32	32	32	32	10	Km/h
c_v^{wage}	60,76	56,55	38,47	28,49	27,18	R\$ por hora
c_v^{ope}	25,69	37,15	43,22	13,94	2,07	R\$ Por hora
c_v^{km}	1,49	1,78	1,89	0,94	0,19	R\$ por km

Onde: n_v^{cap} é a capacidade do veículo, t_v^{setup} , t_v^{prep} , t_v^{load} e t_v^{serv} são tempos de preparação, despacho, carregamento do veículo e atendimento, T_{max} o tempo de serviço máximo, ζ_v^{intra} e ζ_v^{line} as velocidades entre paradas e em *line-haul*, e c_v^{wage} , c_v^{ope} , c_v^{km} são custos salarial e operacionais

Alguns parâmetros são adotados com base na literatura. As informações de tempo de serviço (t_v^{serv}) dos veículos e de velocidades de bicicleta, em percurso *line-haul* e localmente dentro dos distritos (ζ_v^{line} e ζ_v^{intra}), são obtidas do trabalho de Pina-Pardo *et al.* (2022). As informações de velocidades de caminhões (ζ_v^{line} e ζ_v^{intra}) são obtidas de um trabalho que também retrata um problema de distribuição na cidade de São Paulo, de Cunha e Yoshizaki (2018). E as informações de velocidades de vans (ζ_v^{line} e ζ_v^{intra}) são adotadas a partir de análises gráficas visualizadas no trabalho de Amaral (2018).

Os demais parâmetros temporais, isto é, de jornada de trabalho e de tempo de operação, são adotados de acordo com premissas da pesquisa aqui proposta. O turno de serviço máximo

(T_{\max}) dos funcionários que atuam na entrega das mercadorias é adotado como 8 horas, de acordo com a jornada de trabalho usual no Brasil. Já os tempos de carregamento dos veículos (t_v^{load}) e de despacho (t_v^{prep}) são considerados nulos, pois não são efetuados pelos funcionários responsáveis pela entrega e, assim, não são deduzidos do tempo máximo do serviço de entrega. E o tempo de setup (t_v^{setup}) por cliente é nulo, pois considera-se apenas o tempo de serviço (t_v^{serv}), de acordo com referência da literatura.

As informações de custos, como c_v^{wage} , c_v^{ope} e c_v^{km} , são determinadas com base em valores de referência para região de São Paulo (Brasil). Os custos fixos e variáveis dos caminhões e vans são obtidos através de tabelas de frete (Guia do TRC, 2023), considerando a divulgação de abril de 2023. Para as vans, são adotados os custos médios da tabela de veículo do tipo furgão leve, que tem capacidade de carga útil média de 650kg. Já para os caminhões, são adotados os custos médios das tabelas de caminhão semi-leve, com capacidade de carga útil aproximada de 3 toneladas, de caminhão leve, com capacidade aproximada de 4 toneladas, e de caminhão médio, com capacidade aproximada de 6 toneladas. Esses caminhões de menor porte são adotados, por se tratar de um problema de distribuição urbana e por haver restrições de tráfego de caminhões pesados na cidade de São Paulo. Vale observar que esses valores brasileiros são razoavelmente compatíveis em proporções com os valores da literatura.

Com relação aos custos fixos e variáveis de bicicletas, é necessário desenvolver algumas formulações de custos. As tabelas de frete do Guia do TRC (2023) não compreendem o modo de transporte bicicleta, mas apenas motocicletas. Alguns custos de motocicletas puderam ser aproveitados para os custos de bicicleta deste trabalho, como o custo de pessoal e de lavagem de veículo. Os demais custos são obtidos por formulações de custos, com valores de referência encontrados em notícias de empresas que comercializam serviços para bicicletas. De modo geral, utiliza-se como base o método Leonês (Ferraz, 1999 apud Ferraz e Torres, 2004), com a adoção de novas premissas e algumas simplificações. No **Anexo A**, as considerações de custos de transportes são detalhadas.

As capacidades dos veículos (n_v^{cap}) são determinadas em quantidade de pacotes, com base em valores da literatura e das tabelas de frete. Pina-Pardo *et al.* (2022) consideram uma capacidade de 15 pacotes para bicicleta cargueira e de 50 pacotes para van, em um estudo de caso de distribuição de comércio eletrônico na região de Manhattan. No estudo aqui presente, as capacidades em carga útil são conhecidas para os tipos de veículos, a saber: 200 kg para

bicicleta, 650kg para vans, 3000kg para caminhão semi-leve, 4000kg para caminhão leve e 6000kg para caminhão médio.

Tendo conhecimento destas informações de capacidades, parte-se da premissa de que as capacidades em pacotes para os tipos de veículos são direta e linearmente proporcionais às capacidades em peso. Considera-se a bicicleta de carga como ponto de partida, com capacidade de 200kg e podendo transportar 15 pacotes, e calcula-se as capacidades em quantidade de pacotes para os demais tipos de veículos. Isso significa, por exemplo, que a capacidade do caminhão semi-leve é 15 vezes maior que a capacidade da bicicleta, suportando 3000kg e 225 pacotes. Essa premissa é adotada, uma vez que os volumes dos pacotes são desconhecidos e que a adoção de fator de cubagem é usual no transporte de comércio eletrônico (ver por exemplo, E-commerce Brasil, 2021b). Por fim, vale destacar que o *drop size* médio para aproximadamente 98% da base de clientes é de 1 pacote, ou seja, cada cliente geralmente recebe 1 pacote. Portanto, as capacidades dos veículos em quantidade de pacotes podem ser traduzidas para quantidade de clientes atendidos.

Após determinar os parâmetros operacionais dos tipos de veículos, a formulação de aproximação contínua pode ser aplicada para obter o dimensionamento médio das frotas e os custos de distribuição. As **Equações 16 e 17** permitem encontrar o custo de distribuição e o dimensionamento da frota homogênea de primeiro estágio, composta por caminhões. O custo de distribuição no primeiro estágio compreende custos de transporte no percurso de *line-haul*, entre o centro de distribuição e o satélite. Já o custo de distribuição no segundo estágio, por sua vez, compreende custos de transbordo no satélite, custos de transporte dentro dos distritos de entrega e custos de transporte no percurso de *line-haul*, entre o satélite e os distritos de entregas. Assim, as **Equações 10 a 15** permitem encontrar o custo de distribuição e o dimensionamento da frota, para servir cada distrito de entrega no segundo estágio, com um determinado tipo de veículo.

Nesse sentido, para estudo de frotas homogêneas de vans e bicicletas, no segundo estágio, as aproximações são empregadas para seis tipos de divisões distritais, considerando três cenários de demanda. As divisões distritais analisadas são: distritos administrativos, setores censitários, segmentos de 1km², segmentos de 0,25km², segmentos de 4km² e segmentos de 9km². Esses cenários são comparados com o cenário de aproximação de distâncias para a área de serviço total, isto é, sem divisões distritais.

Além disso, também são investigados cenários de distribuição com frotas heterogêneas no segundo estágio. Para definir quais distritos de entrega são atendidos por frota de bicicletas e quais são atendidos por frota de vans, utiliza-se a formulação de programação linear inteira, descrita nas **Equações 18 a 21**. Inicialmente, resolvemos o problema considerando que há disponibilidade de veículos. E posteriormente, algumas restrições de disponibilidade de veículos são introduzidas para análise de sensibilidade dos custos, isto é, para identificar o quanto a adoção de maior parcela de um modo de transporte pode influenciar nos custos de distribuição. Os cenários de frotas heterogêneas também são explorados para as divisões em distritos administrativos, setores censitários, segmentos de 1km², segmentos de 0,25km², segmentos de 4km² e segmentos de 9km².

Por fim, a análise exploratória é realizada para compreender os reflexos em custos de distribuição de empregar modelos distintos de distribuição. Os cenários de distribuição em dois estágios, usando frotas heterogêneas, são confrontados com cenários de distribuição em estágio único, usando frotas homogêneas. Nesse sentido, são exploradas as composições de frotas abaixo para três cenários de demanda, isto é, de alta, média e baixa demanda.

- Distribuição em estágio único, com frota regular homogênea de caminhões semi leves transportando os produtos do centro de distribuição, situado fora da cidade, até os PODs;
- Distribuição em estágio único, com frota regular homogênea de caminhões leves transportando os produtos do centro de distribuição, situado fora da cidade, até os PODs;
- Distribuição em estágio único, com frota regular homogênea de caminhões médios transportando os produtos do centro de distribuição, situado fora da cidade, até os PODs;
- Distribuição em estágio único, com frota regular homogênea de vans transportando os produtos do centro de distribuição, situado fora da cidade, até os PODs;
- Distribuição em dois estágios, com uma frota homogênea de caminhões semi-leves no primeiro estágio, transportando os produtos do centro de distribuição até o satélite, e com uma frota heterogênea de vans e bicicletas, transportando os produtos do satélite até os PODs;
- Distribuição em dois estágios, com uma frota homogênea de caminhões leves no primeiro estágio, transportando os produtos do centro de distribuição até o satélite, e com uma frota heterogênea de vans e bicicletas, transportando os produtos do satélite até os PODs;
- Distribuição em dois estágios, com uma frota homogênea de caminhões médios no primeiro estágio, transportando os produtos do centro de distribuição até o satélite, e com

uma frota heterogênea de vans e bicicletas, transportando os produtos do satélite até os PODs;

- Distribuição em dois estágios, com uma frota homogênea de vans no primeiro estágio, transportando os produtos do centro de distribuição até o satélite, e com uma frota heterogênea de vans e bicicletas, transportando os produtos do satélite até os PODs.

3.4.4 Fluxograma de Aplicação do Método ao Estudo de Caso

Portanto, a aplicação do método ao estudo de caso compreende 3 seções, com uma série de passos de ferramentas. Para melhor compreensão, é ilustrado no fluxograma da **Figura 9**.

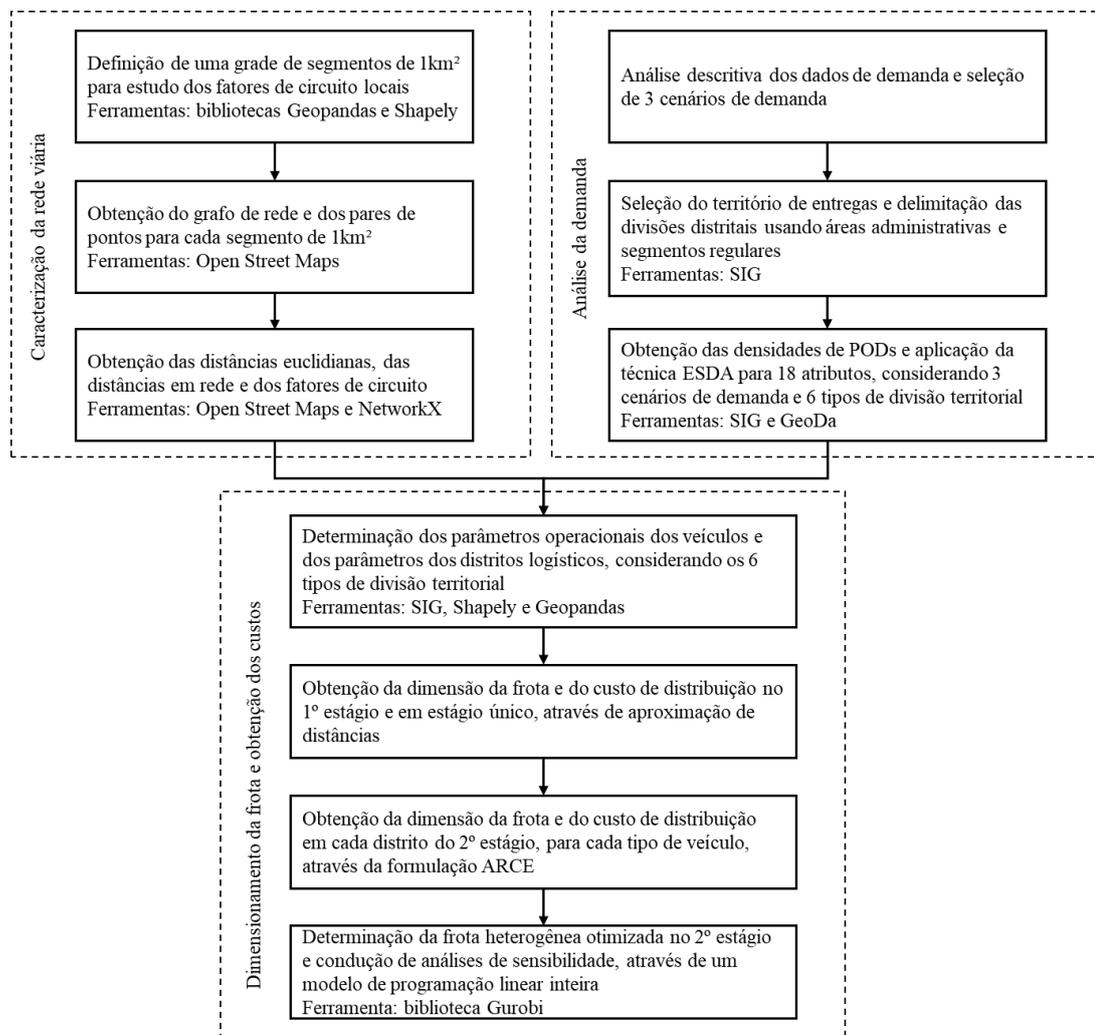


Figura 9: Fluxograma de aplicação do método

4. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados da aplicação do método descrito no capítulo 3. Os resultados estão divididos em três seções. A primeira (**Seção 4.1**) contempla os resultados obtidos para o procedimento descrito na **Seção 3.4.1**, sobre fatores de circuito locais da rede viária da cidade de São Paulo. A segunda (**Seção 4.2**), por sua vez, compreende os resultados obtidos para o procedimento descrito na **Seção 3.4.2** da análise espacial de dados de densidade de demanda. A terceira (**Seção 4.3**) contempla os resultados obtidos para o procedimento descrito na **Seção 3.4.3**, ou seja, as análises de dimensão de frota e custos, usando aproximação e programação linear inteira.

4.1 Caracterização da Rede Viária com Fatores de Circuito Locais

A seguir são apresentados os resultados de circulação local, para rede viária de uma região de São Paulo que abrange a área de serviço de entrega selecionada nesse estudo. Através do Open Street Maps, é possível obter a rede de vias característica para cada modo de transporte, isto é, para bicicleta, para automóvel e para caminhada. As redes de bicicleta e automóvel são orientadas de acordo com o sentido das vias, havendo vias de mão dupla e de mão única. Já a rede de caminhada não é orientada. Com o estudo dos fatores de circuito, busca-se compreender se há diferenças relevantes nas distâncias percorridas entre usar os diferentes modos de transporte.

Como descrito na **seção 3.4.1**, para obtenção dos fatores de circuito, são gerados trajetos entre pares de pontos aleatórios dentro de cada segmento de 1km² da grade de segmentos. Assim, são consideradas viagens para diferentes faixas de distância euclidiana, até 1,4km. Os resultados para automóveis, bicicletas e caminhada são apresentados nos gráficos das **Figuras 10, 11 e 12**, em que cada ponto do gráfico representa uma viagem entre um par de pontos em rede.

A partir dos gráficos, observa-se que as distribuições obtidas para automóveis e bicicletas são semelhantes entre si. Ambas as distribuições indicam que o fator de circuito tende a diminuir à medida que a distância euclidiana entre origem e destino aumenta. A partir de distâncias euclidianas de aproximadamente 500 metros, os fatores de circuito começam a

estabilizar. Além disso, nota-se a ocorrência de valores relevantemente altos de fatores de circuito para pontos próximos entre si, isto é, com distância euclidiana pequena. Isso ocorre porque a distância euclidiana compõe o dominador do fator de circuito e, dessa forma, para distâncias euclidianas extremamente pequenas, o fator de circuito tende para o infinito. Para reduzir esse efeito, são considerados pares de viagem com distância superior a 1 metro.

Tendo em vista o Open Street Maps considera a mesma sinalização de trânsito e mão de via para bicicletas trafegando em ruas, são gerados resultados de fator de circuito de caminhada para comparação. Com isso, é possível observar que o comportamento da distribuição obtida para caminhada se distingue da distribuição de automóveis. Nota-se que valores relevantemente altos de fatores de circuito para pontos próximos entre si, isto é, com distância euclidiana pequena, ocorrem em quantidade bem menor.

A **Figura 13** apresenta o *boxplot* para o conjunto de dados referente aos fatores de circuito de automóveis, bicicletas e caminhada. Para geração do *boxplot*, são considerados os fatores de circuito médios encontrados para os segmentos de 1km² da região estudada. O fator de circuito médio de cada segmento é calculado como a média dos fatores de circuito obtidos para os 190 pares de pontos gerados aleatoriamente. A partir do *boxplot*, fica evidente que as distribuições de fatores de circuito são semelhantes entre bicicletas e automóveis, tendo em vista que a média e os quartis exibem valores muito próximos. Já a distribuição de fator de circuito de caminhada exhibe valor médio 16% e 19% abaixo dos valores médios de distribuição de automóveis e bicicletas, respectivamente.

A similaridade entre fatores de circuito locais observada na **Figura 13** indica que não há diferenças relevantes em termos de distâncias percorridas entre usar uma bicicleta e usar um automóvel. Vale observar que a ferramenta Open Street Maps não considera algumas situações operacionais para bicicletas, como por exemplo, a possibilidade de o motorista desmontar da bicicleta e atravessar uma rua como pedestre, para poder mudar de direção em uma via de mão dupla. Ainda assim, para ambos os modos de transporte, o trajeto em rede se mostra duas vezes maior do que o trajeto em linha reta, que poderia ser percorrido por um modo de transporte aéreo. Em alguns segmentos da cidade a distância em rede chega a ser quatro vezes maior que a distância euclidiana.

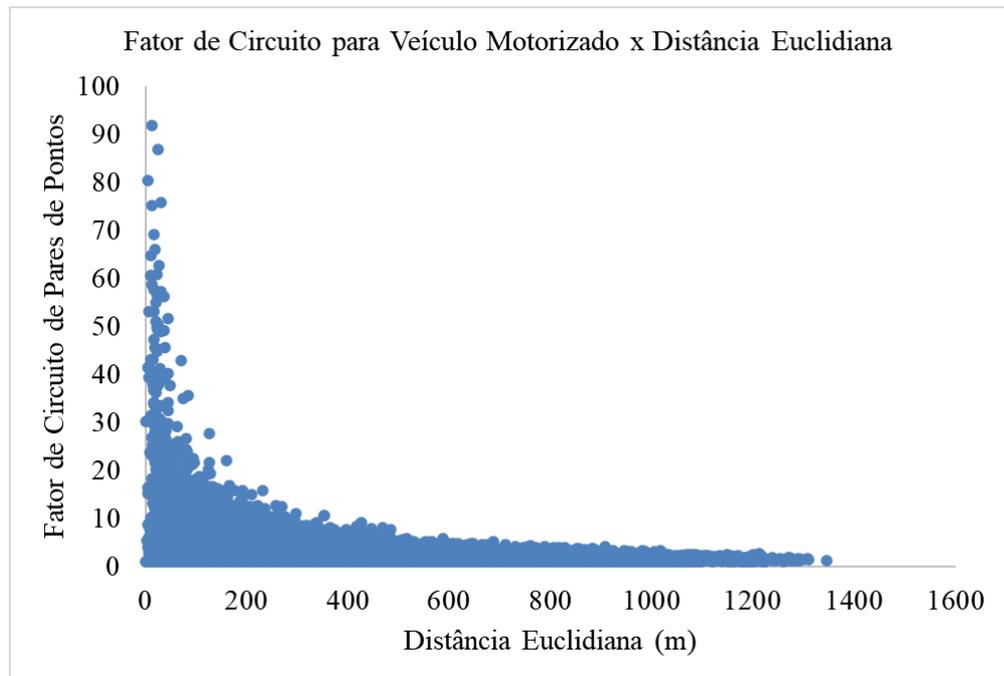


Figura 10: Distribuição de fatores de circuito para veículos motorizados, em função da distância euclidiana entre pares de pontos (elaboração própria)

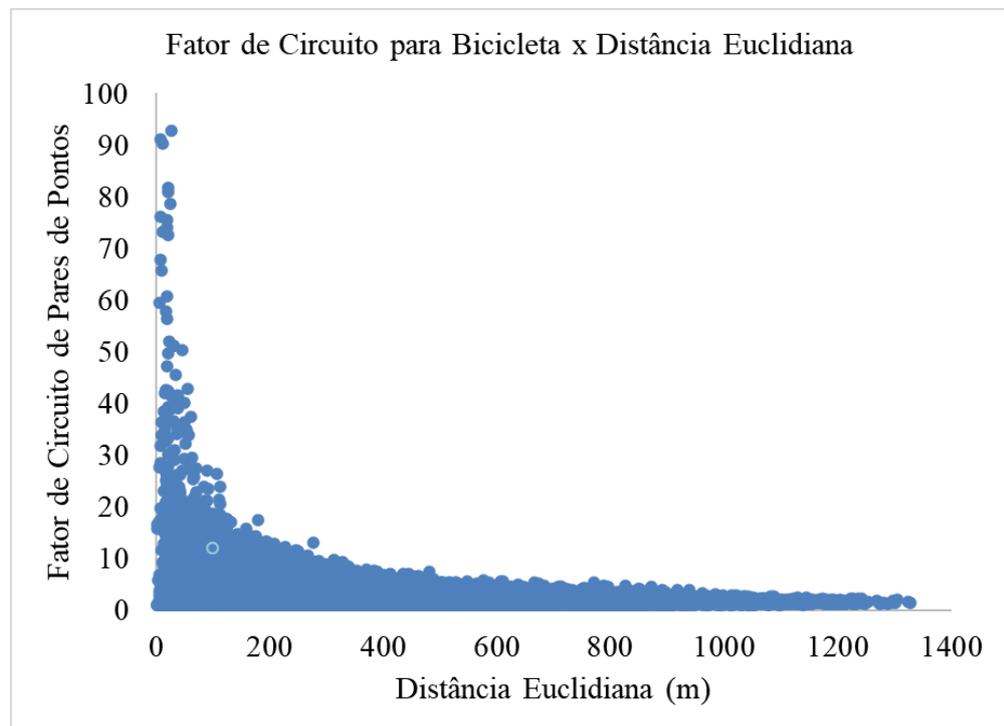


Figura 11: Distribuição de fatores de circuito para veículos não-motorizados, em função da distância euclidiana entre pares de pontos (elaboração própria)

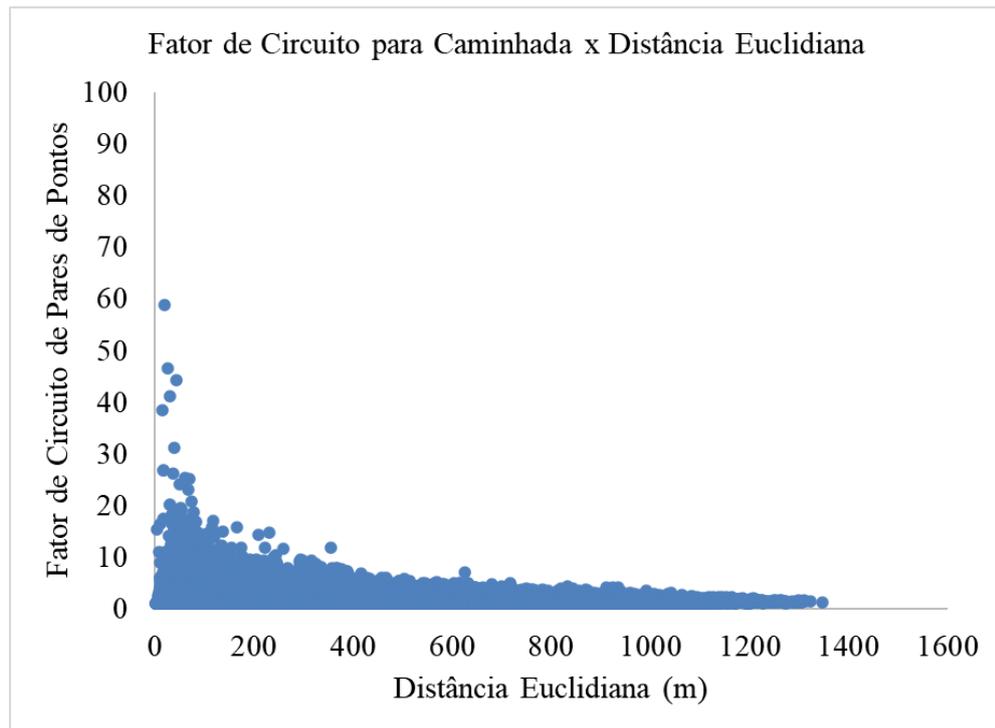


Figura 12: Distribuição de fatores de circuito para caminhada, em função da distância euclidiana entre pares de pontos (elaboração própria)

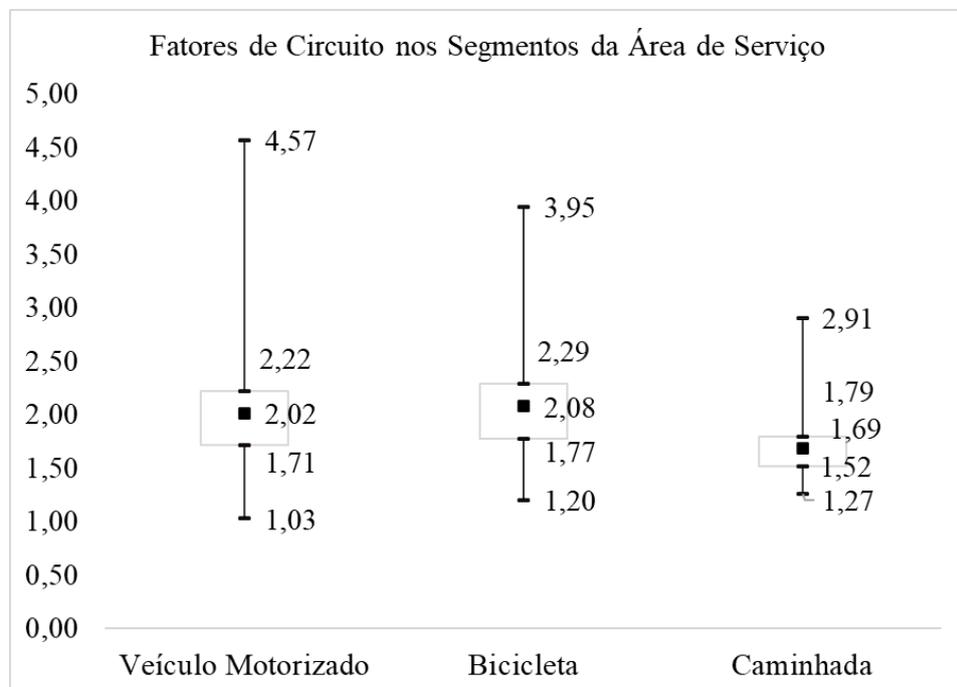


Figura 13: *Boxplot* dos fatores de circuito médios dos segmentos de uma região de São Paulo, para veículos motorizados e não-motorizados (elaboração própria)

Os resultados dos fatores de circuito médios dos segmentos também são representados através de mapas temáticos. Os mapas gerados para veículos motorizados e não-motorizados estão nas **Figuras 14 e 15**, respectivamente. Nota-se a ocorrência de segmentos de maior fator de circuito (escala de cor escura), tanto para bicicletas como para automóveis, nas áreas próximas a vias principais e de alta circulação e na região central da cidade. Essas vias principais estão representadas em cor amarela nos mapas temáticos. Nas proximidades da Marginal Pinheiros, Marginal Tietê, Avenida do Estado e Avenida 23 de Maio, por exemplo, são observados segmentos com maior fator de circuito. Com isso, depreende-se que as dificuldades de circulação influenciam de forma semelhante as frotas de bicicletas e de vans e caminhões.

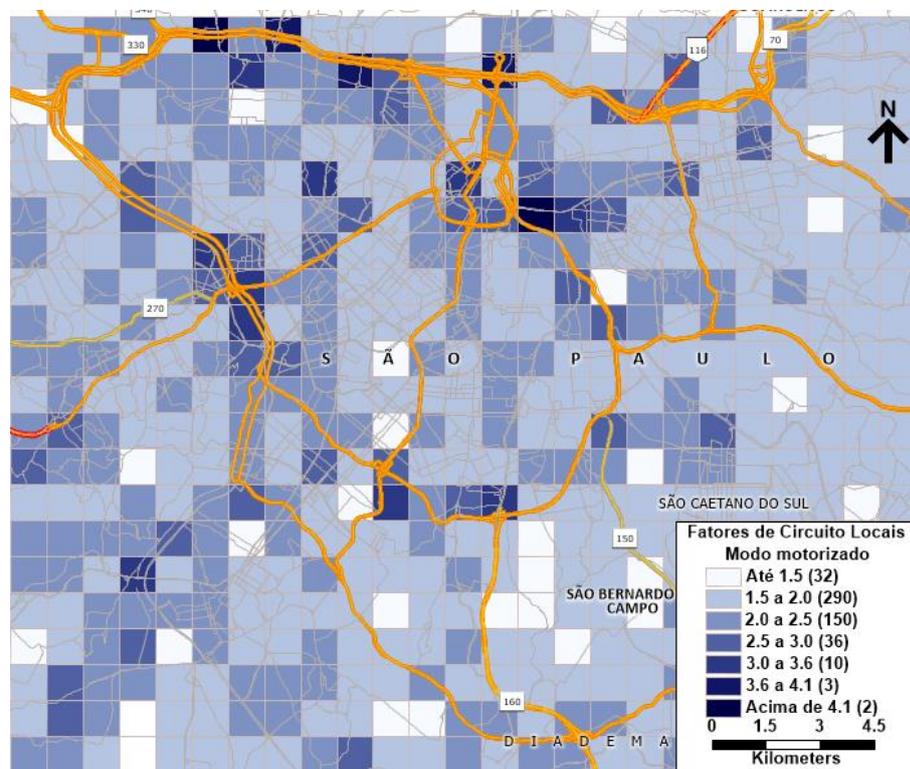


Figura 14: Mapa temático representando os fatores de circuito médios identificados nos segmentos da região de São Paulo em estudo, considerando automóveis (elaboração própria)

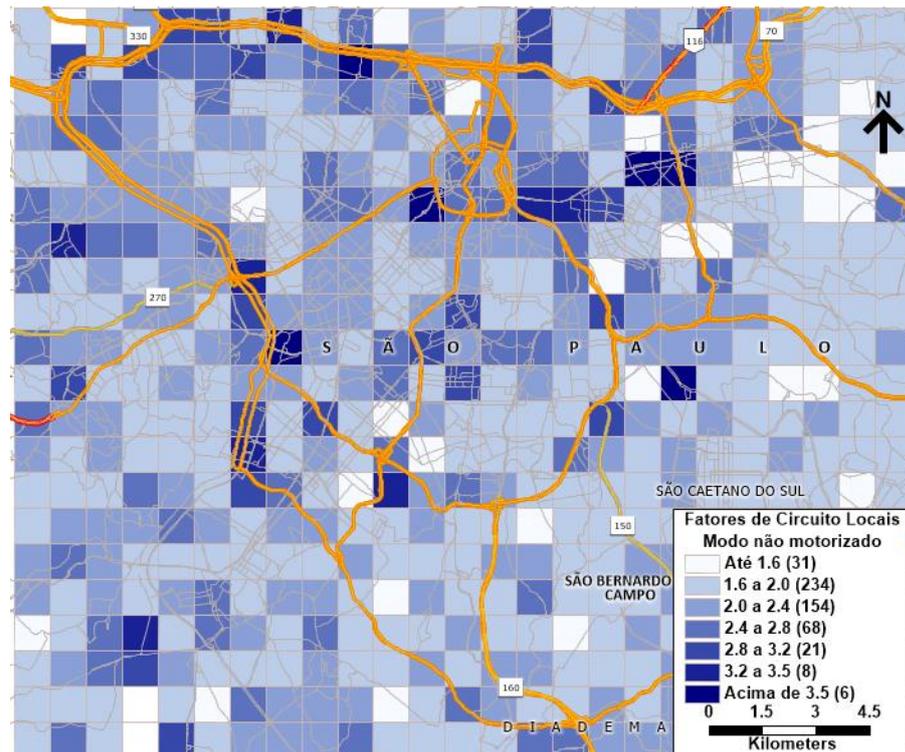


Figura 15: Mapa temático representando os fatores de circuito médios identificados nos segmentos da região de São Paulo em estudo, considerando bicicletas (elaboração própria)

4.2 Análise Espacial dos Dados de Densidade de Demanda

A seguir são apresentados os resultados da análise espacial exploratória dos dados de demanda. Essa análise contribui para investigação da pergunta de pesquisa sobre a ocorrência de correlações espaciais de vizinhança significativas para definir regiões homogêneas, ou seja, distritos logísticos homogêneos em densidade de demanda.

Como descrito na **Seção 3.4.2**, há dezoito atributos para explorar, que são definidos considerando os três cenários de demanda e as seis formas de divisão da área de serviço. Com essa análise de sensibilidade, variando as proporções dos segmentos e a demanda, busca-se identificar se homogeneidade ocorre em maior grau. A análise espacial é conduzida separadamente para os setores censitários, para os distritos urbanos, para os segmentos de 1km², para os segmentos de 0,25km², para os segmentos de 4km² e para os segmentos de 9km². Portanto, os dezoito atributos explorados são apresentados abaixo:

- Densidade de PODs nos setores censitários, em um cenário de demanda média com 1797 PODs;
- Densidade de PODs nos segmentos de 0,25km², em um cenário de demanda média com 1797 PODs;
- Densidade de PODs nos segmentos de 1km², em um cenário de demanda média com 1797 PODs;
- Densidade de PODs nos segmentos de 4km², em um cenário de demanda média com 1797 PODs;
- Densidade de PODs nos segmentos de 9km², em um cenário de demanda média com 1797 PODs;
- Densidade de PODs nos distritos urbanos, em um cenário de demanda média com 1797 PODs;
- Densidade de PODs nos setores censitários, em um cenário de alta demanda com 2484 PODs;
- Densidade de PODs nos segmentos de 0,25km², em um cenário de alta demanda com 2484 PODs;
- Densidade de PODs nos segmentos de 1km², em um cenário de alta demanda com 2484 PODs;
- Densidade de PODs nos segmentos de 4km², em um cenário de alta demanda com 2484 PODs;
- Densidade de PODs nos segmentos de 9km², em um cenário de alta demanda com 2484 PODs;
- Densidade de PODs nos distritos urbanos, em um cenário de alta demanda com 2484 PODs;
- Densidade de PODs nos setores censitários, em um cenário de baixa demanda com 1507 PODs;
- Densidade de PODs nos segmentos de 0,25km², em um cenário de baixa demanda com 1507 PODs;
- Densidade de PODs nos segmentos de 1km², em um cenário de baixa demanda com 1507 PODs;

- Densidade de PODs nos segmentos de 4km², em um cenário de baixa demanda com 1507 PODs;
- Densidade de PODs nos segmentos de 9km², em um cenário de baixa demanda com 1507 PODs;
- Densidade de PODs nos distritos urbanos, em um cenário de baixa demanda com 1507 PODs.

Com base no mapa temático e no gráfico das **Figuras 16 e 17**, pode-se depreender que não há correlações espaciais significativas entre os setores censitários, para o atributo densidade de PODs, em dia de demanda média. Pelo gráfico de espalhamento de Moran, verifica-se a ausência de correlações e um índice de Moran igual a 0,042. Isso porque valores próximos de 1 e -1 para o índice de Moran indicam correlações significativas, enquanto valores próximos de 0 indicam ausência.

Na mesma linha, pelo *box map* da **Figura 16**, é possível verificar que não há regiões contínuas e homogêneas. Há uma grande quantidade de setores censitários definidos no quadrante “*Low-low*”, pois apresentam, assim como seus vizinhos, uma densidade de PODs inferior à média da área de serviço. Há algumas concentrações de setores no quadrante “*High-high*”, que exibem alta densidade e são circundados por setores de alta densidade também. No entanto, esses setores classificados no quadrante “*High-high*” são, em sua maior parte, vizinhos de setores classificados nos quadrantes “*Low-high*” e “*Low-low*”, ao invés de serem vizinhos de outros setores classificados como “*High-high*” ou “*High-low*”. Por conta disso, não são identificadas zonas homogêneas e zonas de borda.

Por outro lado, o mesmo cenário de densidade de demanda média, explorado para divisões em segmentos de 1km², de 0,25km² e de distritos urbanos, apresenta melhores resultados. Pelos gráficos de espalhamento de Moran das **Figuras 19, 21 e 23**, verifica-se que os índices de Moran assumem valores de 0,377, 0,352 e 0,341, respectivamente. Isso significa que, embora os índices estejam mais próximos de 0 do que de 1, ao comparar com o índice obtido para a divisão em setores censitários, esses índices se mostram razoavelmente maiores.

Pelo *box map* da **Figura 18** representando distritos urbanos, verifica-se um padrão de maior densidade no centro e menor densidade em direção a leste e sul. Os distritos no centro da zona de serviço exibem alta densidade e têm vizinhos com alta densidade também, como por exemplo, a região da República, Sé, Liberdade, Bela Vista e Vila Mariana. Como os distritos

apresentam altas proporções de área, em torno de 7km², não há faixas de áreas classificadas como “*High-low*” em seu entorno, mas poucos vizinhos, como Saúde, Brás e Mooca.

Pelos *boxes maps* das Figuras 20 e 22, observa-se que há formação de grupos homogêneos de segmentos, porém, não há zonas de borda. Há uma concentração de segmentos do tipo “*High-high*”, que exibem alta densidade e são circundados por setores de alta densidade, localizada no centro da zona de serviço. Os segmentos “*Low-low*” aparecem nas extremidades da área de serviço. Os segmentos “*Low-high*” aparecem circundados por segmentos “*High-high*”, trazendo descontinuidade para concentração de segmentos de alta densidade. E, embora os segmentos exibam menores proporções de áreas, poucos são classificados como “*High-low*”, o que indica a ausência de zonas de borda.

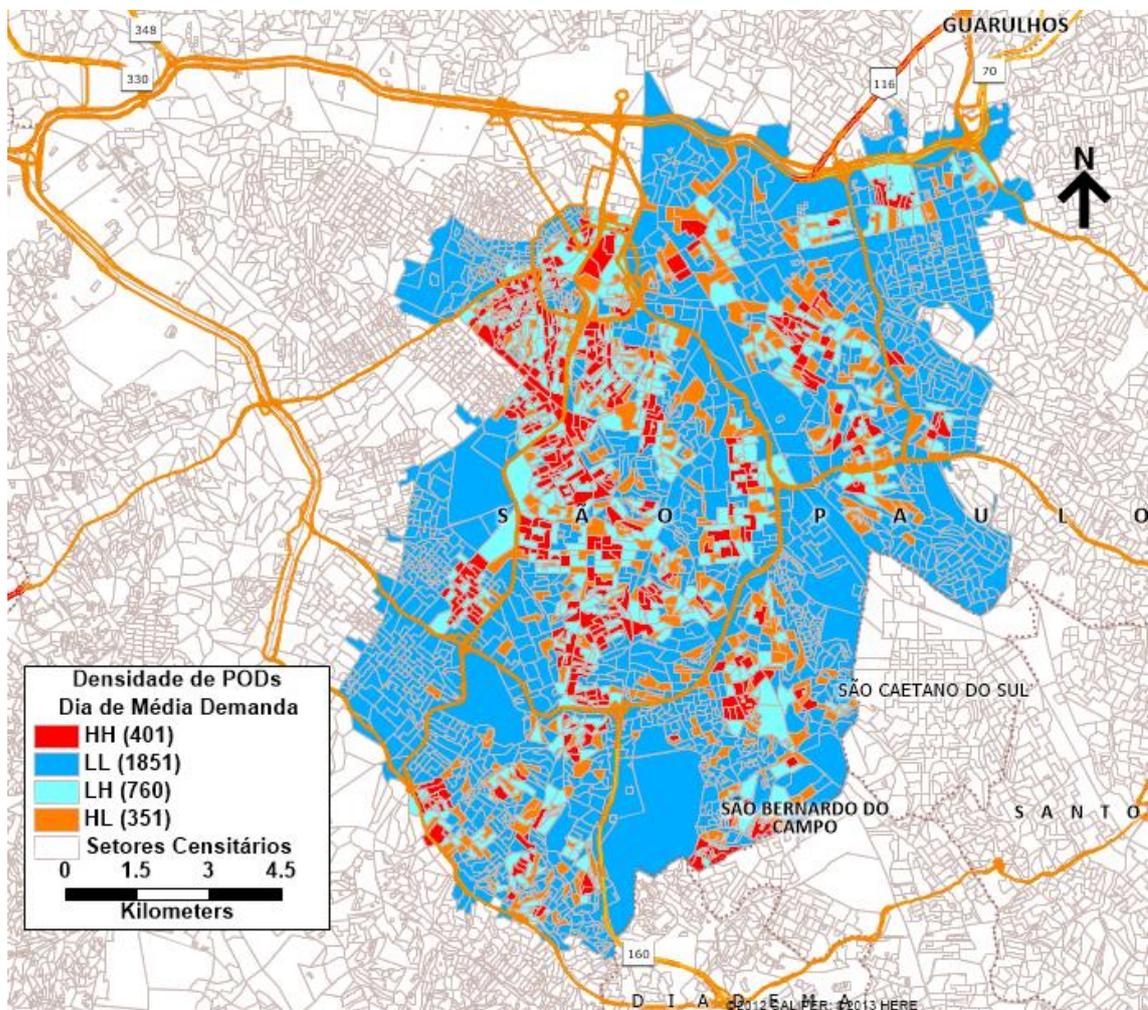


Figura 16: *Box map* representando a densidade de PODs nos setores censitários, em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)

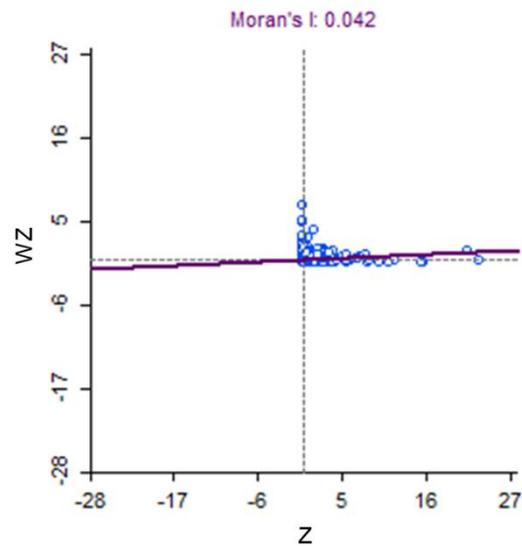


Figura 17: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos setores censitários, em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)

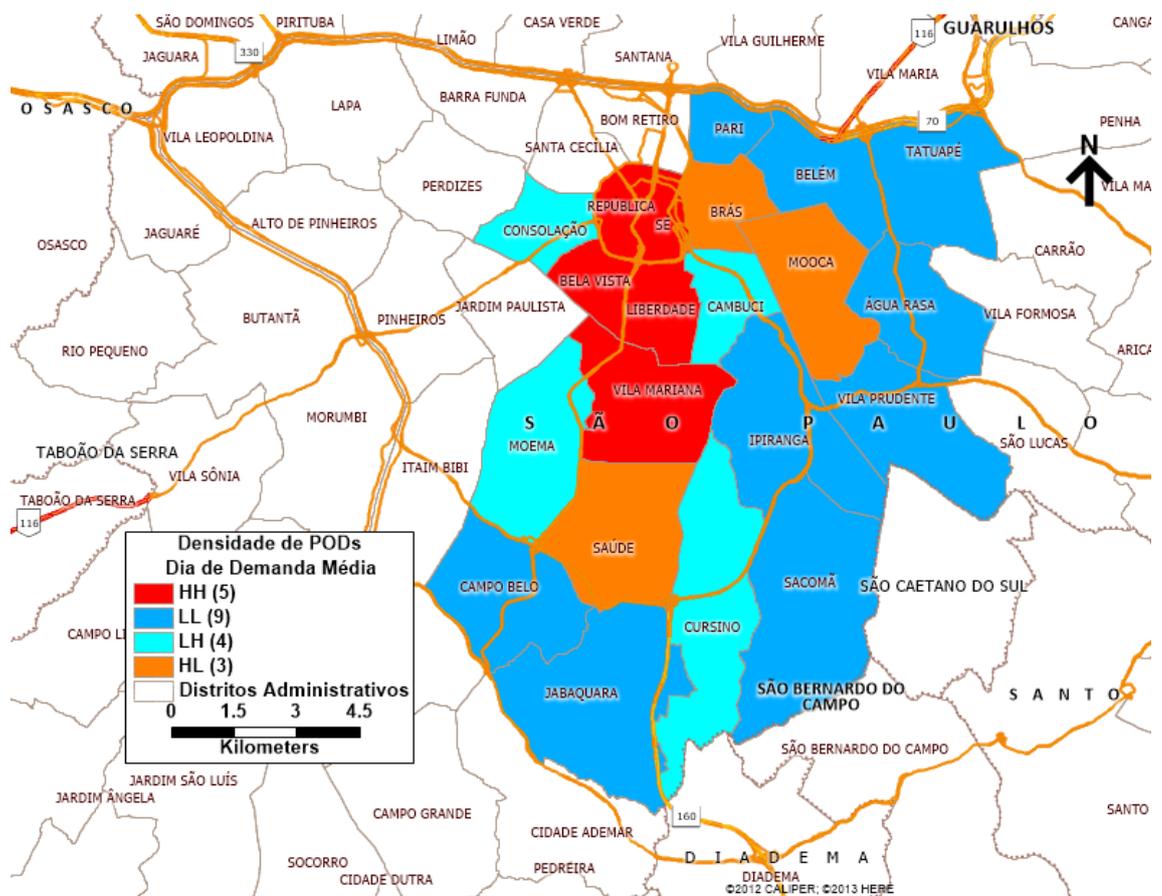


Figura 18: Box map representando a densidade de PODs nos distritos urbanos, em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)

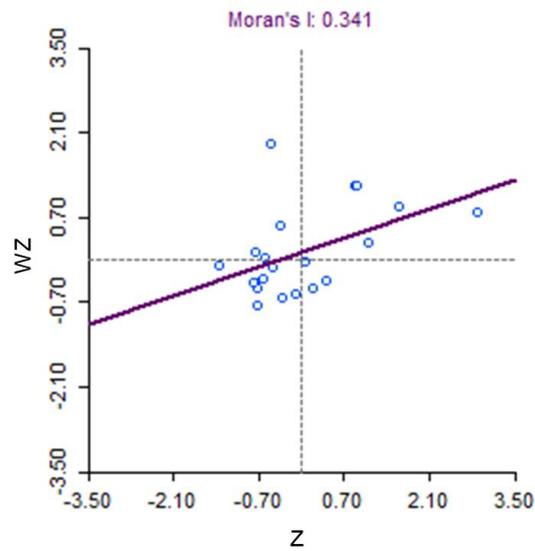


Figura 19: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos distritos urbanos, em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)

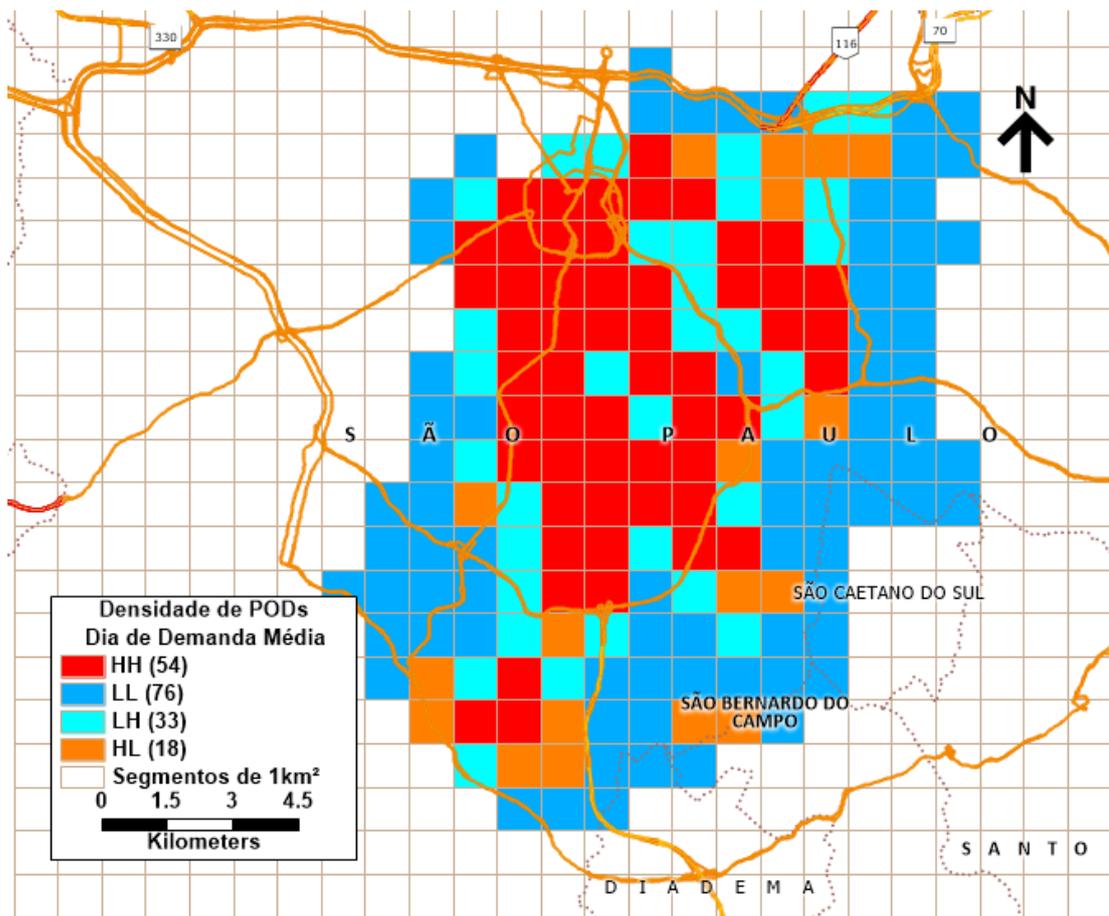


Figura 20: Box map representando a densidade de PODs nos segmentos de 1km², em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)

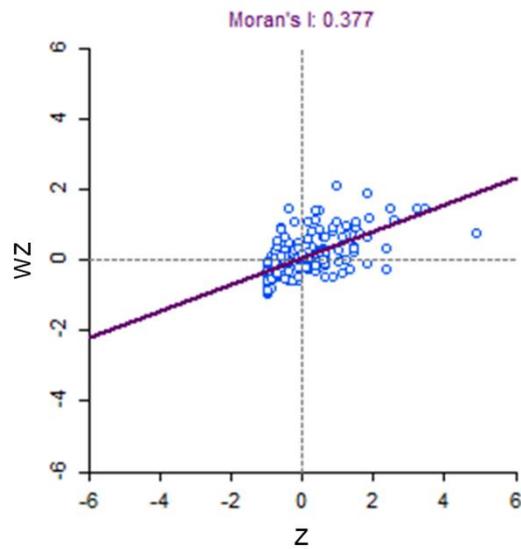


Figura 21: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 1km², em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)

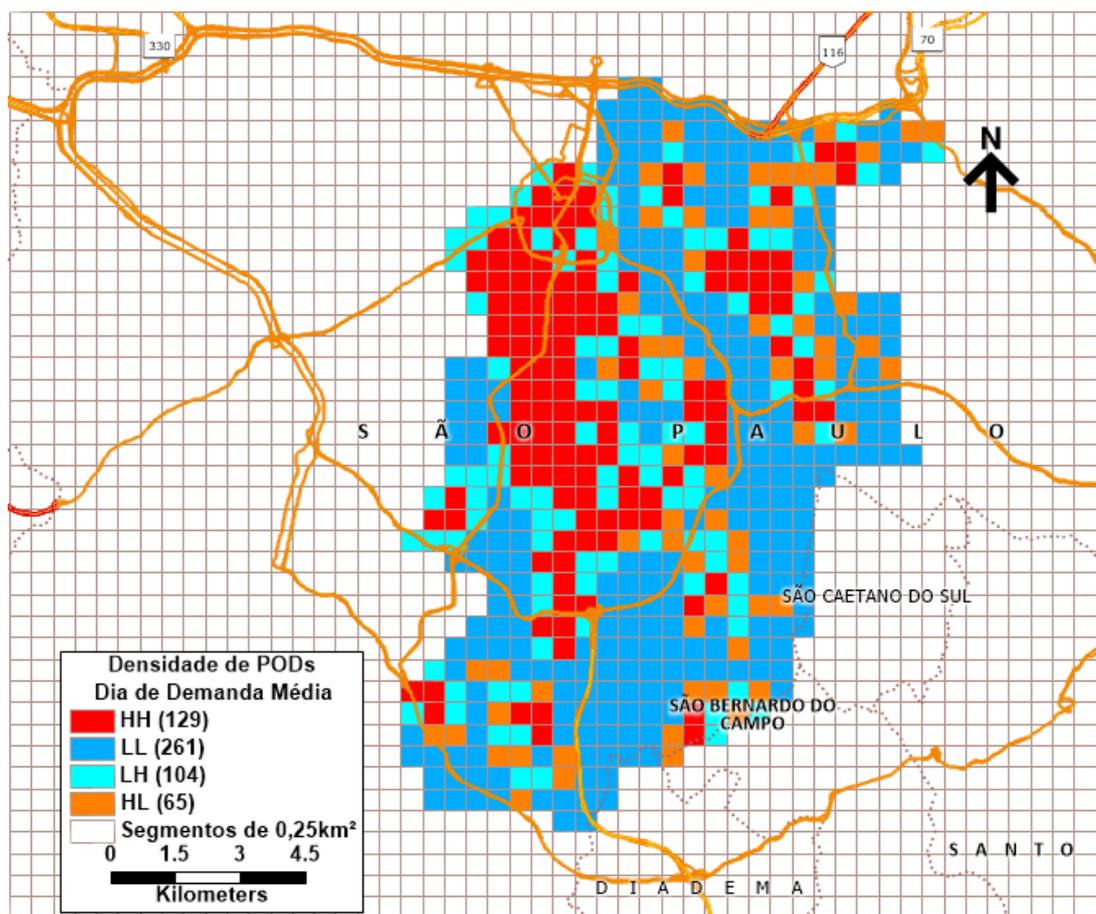


Figura 22: Box map representando a densidade de PODs nos segmentos de 0,25km², em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)

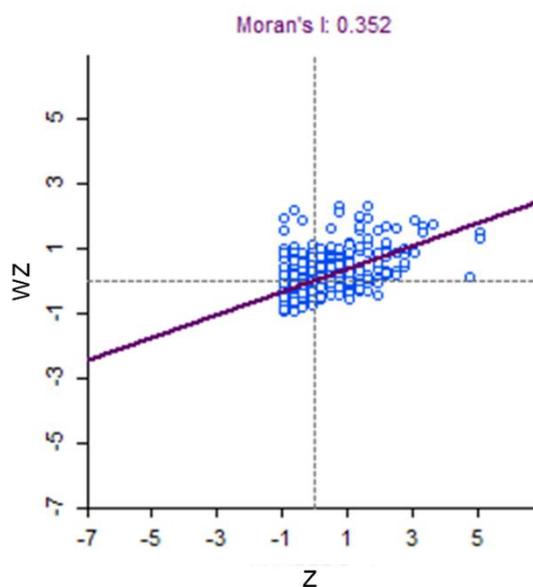


Figura 23: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 0,25km², em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)

Para os resultados usando divisões distritais em segmentos de maiores proporções, ou seja, de 4km² e 9 km², são encontrados menores correlações de vizinhança. Pela análise dos mapas temáticos das **Figuras 24 e 26**, fica evidente que as segmentações em áreas de maiores proporções já não representam bem a delimitação da área de entregas e, inclusive, abrangem regiões de municípios vizinhos. Pelos gráficos de espalhamento de Moran das **Figuras 25 e 27**, verifica-se que os índices de Moran assumem valores mais próximos de 0, isto é, 0,290 e 0,238, respectivamente.

Com a análise de sensibilidade das grades de segmentos e as comparações com as divisões administrativas, depreende-se que nem sempre há uma relação decrescente para o índice de Moran, em função do crescimento de tamanho da área. Por exemplo, a divisão em segmentos de 9km² exibe índice mais próximo de zero, em comparação com os índices das divisões em segmentos de 4km², de 1km², de 0,25km². Em contrapartida, a divisão em distritos administrativos urbanos exibe índice mais distante de zero, em comparação com o índice da divisão administrativa em setores censitários. De modo geral, nota-se também que as divisões em segmentos de 0,25km² e 1km² permitem segmentar a zona de serviço em áreas menores, mantendo um nível mais satisfatório de correlações de vizinhança.

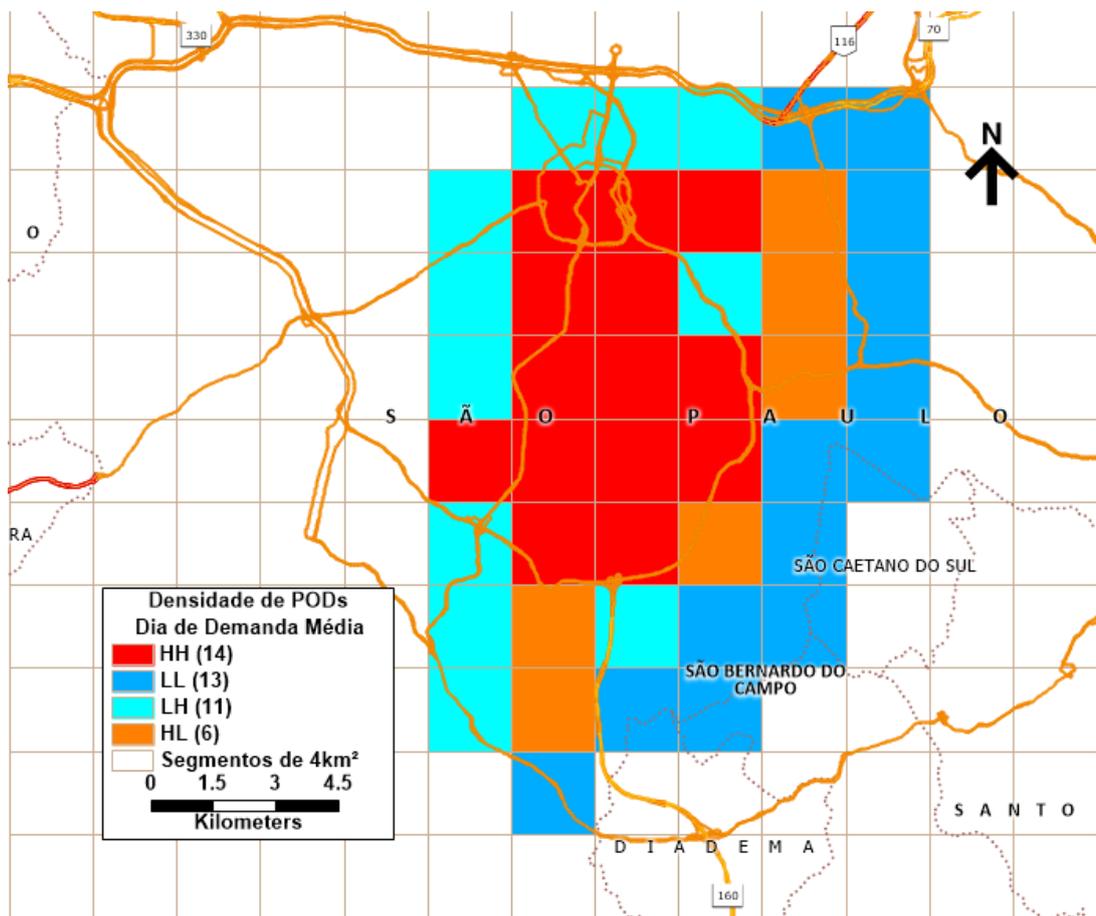


Figura 24: *Box map* representando a densidade de PODs nos segmentos de 4km², em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)

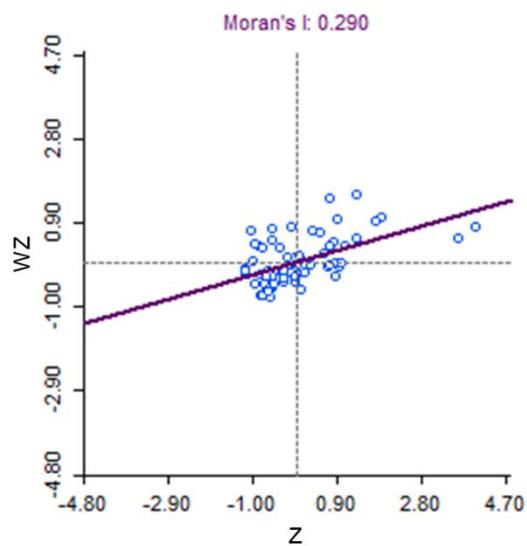


Figura 25: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 4km², em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)

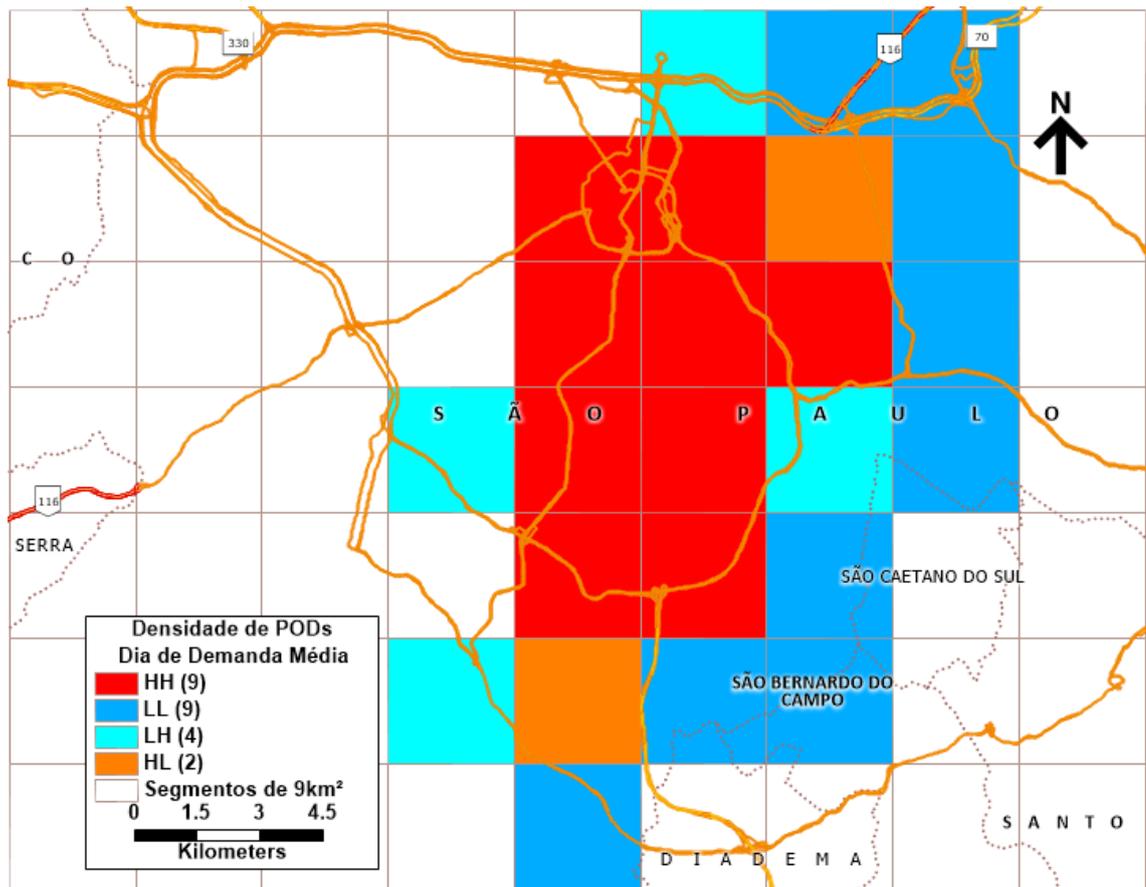


Figura 26: *Box map* representando a densidade de PODs nos segmentos de 9km², em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)

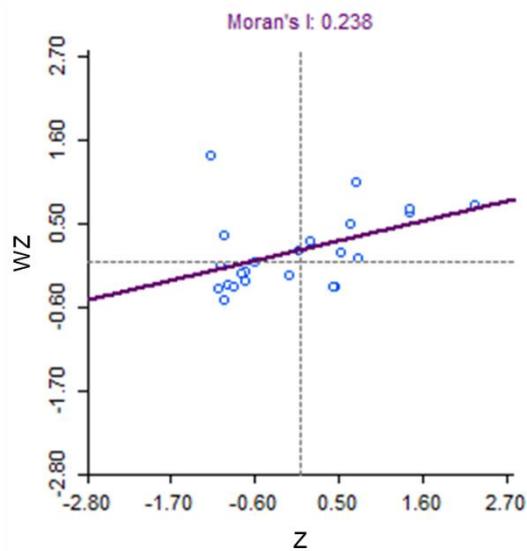


Figura 27: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 9km², em dia de demanda média na área de serviço (elaboração própria)

As análises espaciais também são conduzidas para os cenários de alta demanda. As **Figuras 28 e 29** representam os resultados da análise da densidade de PODs em dia de alta demanda, explorada para divisão em setores censitários. De forma semelhante ao cenário de média demanda, verifica-se que não há regiões contínuas e homogêneas de setores censitários. Pelo gráfico de espalhamento de Moran, da **Figura 29**, verifica-se a ausência de correlações e um índice de Moran igual a 0,025. E pelo *box map* da **Figura 28**, depreende-se que a maior parte dos setores censitários também fica definida no quadrante “*Low-low*”. Os setores do quadrante “*High-high*” também exibem vizinhos classificados nos quadrantes “*Low-high*” e “*Low-low*”. Assim, mesmo em um cenário com demanda maior, não são visualizadas zonas homogêneas e zonas de borda.

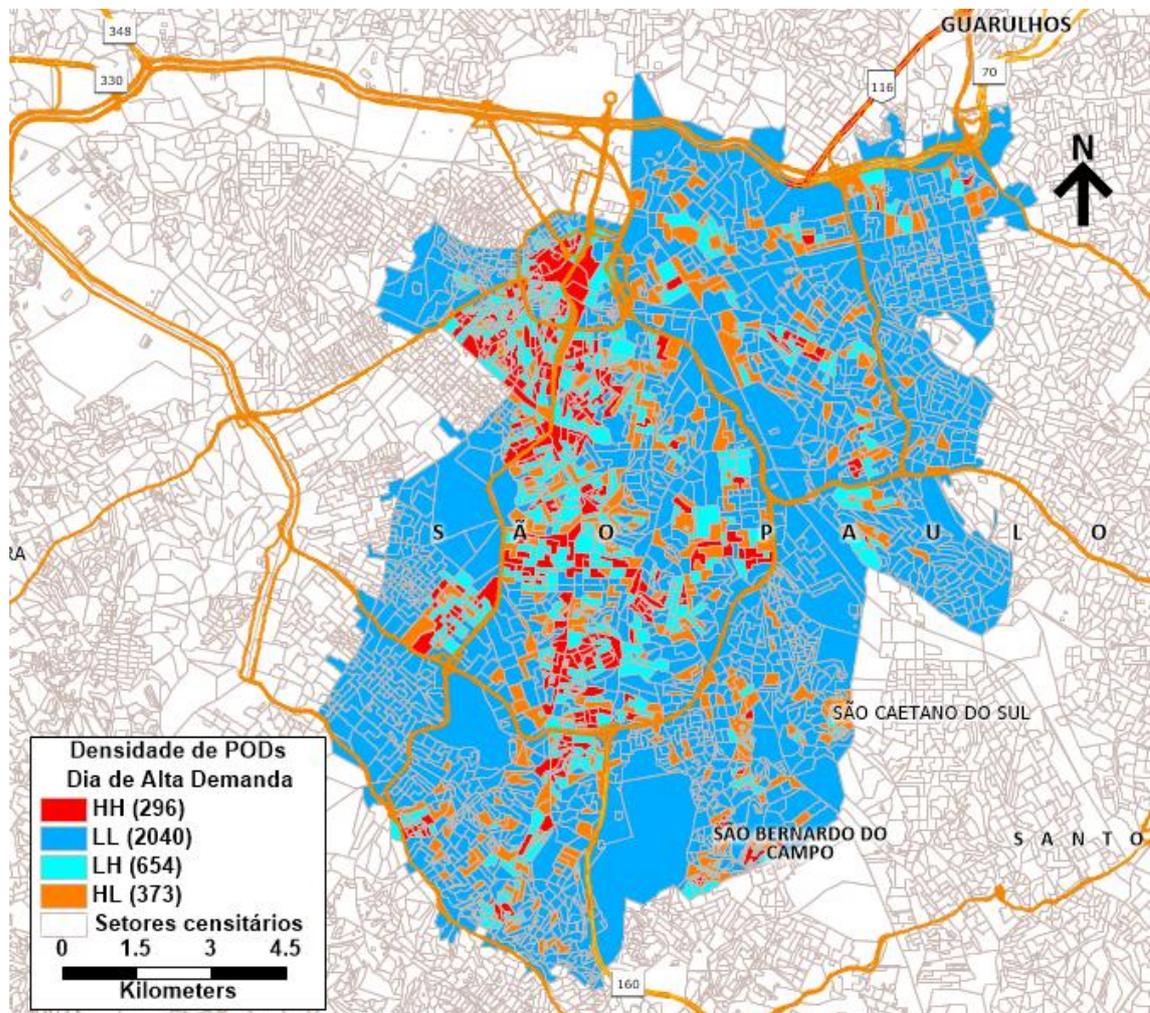


Figura 28: *Box map* representando a densidade de PODs nos setores censitários, em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)

Com relação a divisão em distritos urbanos e em segmentos de 1km², são encontrados resultados semelhantes entre os cenários de média e alta demanda. Pelos gráficos de espalhamento de Moran das **Figuras 31 e 33**, verifica-se que os índices de Moran ficam mais próximos de 0, do que de 1, e que assumem maiores valores em comparação ao índice da divisão em setores censitários. Pelo *box map* da **Figura 30**, representando a divisão em distritos urbanos em cenário de alta demanda, nota-se que a classificação dos distritos fica muito semelhante à classificação obtida no cenário de média demanda, observada na **Figura 18**. Pelo *box map* da **Figura 32**, observa-se a ocorrência de grupos homogêneos de segmentos “*High-high*”, localizados no centro da zona de serviço e, diferentemente do que ocorre no cenário de média demanda da **Figura 20**, não há segmentos do tipo “*High-high*” à leste.

No caso da divisão em segmentos de 0,25km², os resultados denotam maior homogeneidade para o cenário de alta demanda, em comparação ao cenário de média demanda. Pelo gráfico de espalhamento de Moran, da **Figura 35**, verifica-se que o índice de Moran atinge valor de 0,407. Pelo mapa temático da **Figura 34**, nota-se uma razoável homogeneidade, com a ocorrência de mais relações de vizinhança e continuidade para segmentos “*High-high*”, em comparação ao mapa da **Figura 22**. Além disso, os grupos de segmentos “*Low-low*” e “*Low-high*” ocorrem mais ao sul e à leste na zona de entrega e há poucos segmentos classificados como “*High-low*”.

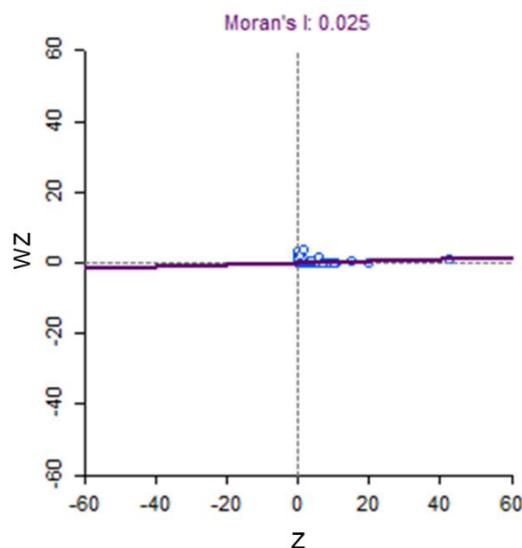


Figura 29: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos setores censitários, em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)

Os resultados do cenário de alta demanda, usando divisões em segmentos de maiores proporções, ou seja, de 4km² e 9 km², são bastante similares aos resultados do cenário de média demanda. Os mapas temáticos das **Figuras 36 e 38** apresentam uma distribuição dos segmentos quase igual a distribuição observada nas **Figuras 24 e 26**. E os gráficos de espalhamento de Moran das **Figuras 37 e 39**, indicam valores para os índices de Moran próximos de 0.

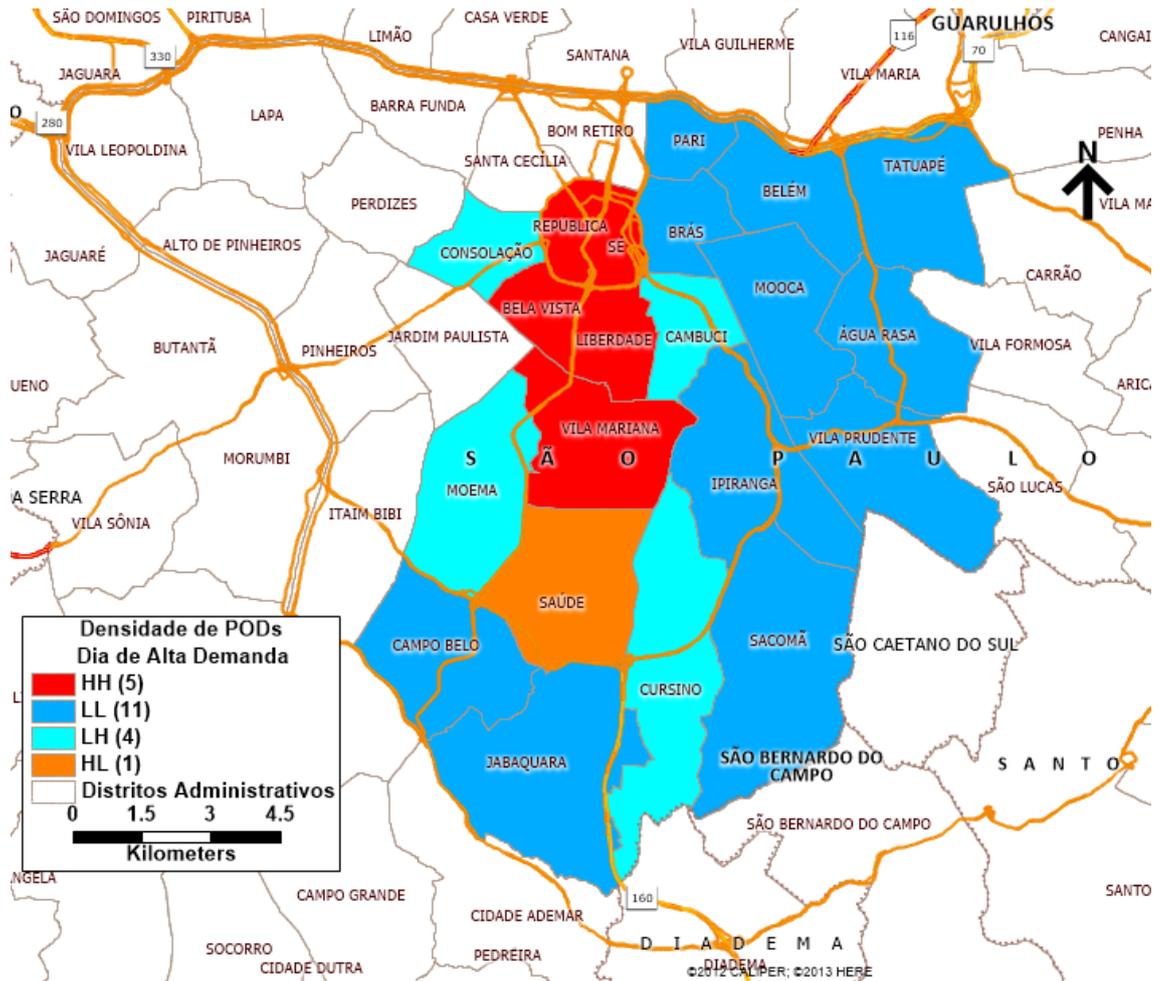


Figura 30: *Box map* representando a densidade de PODs nos distritos urbanos, em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)

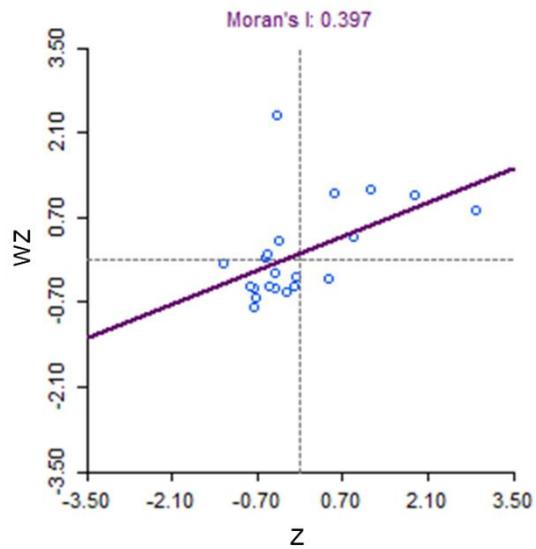


Figura 31: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos distritos urbanos, em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)

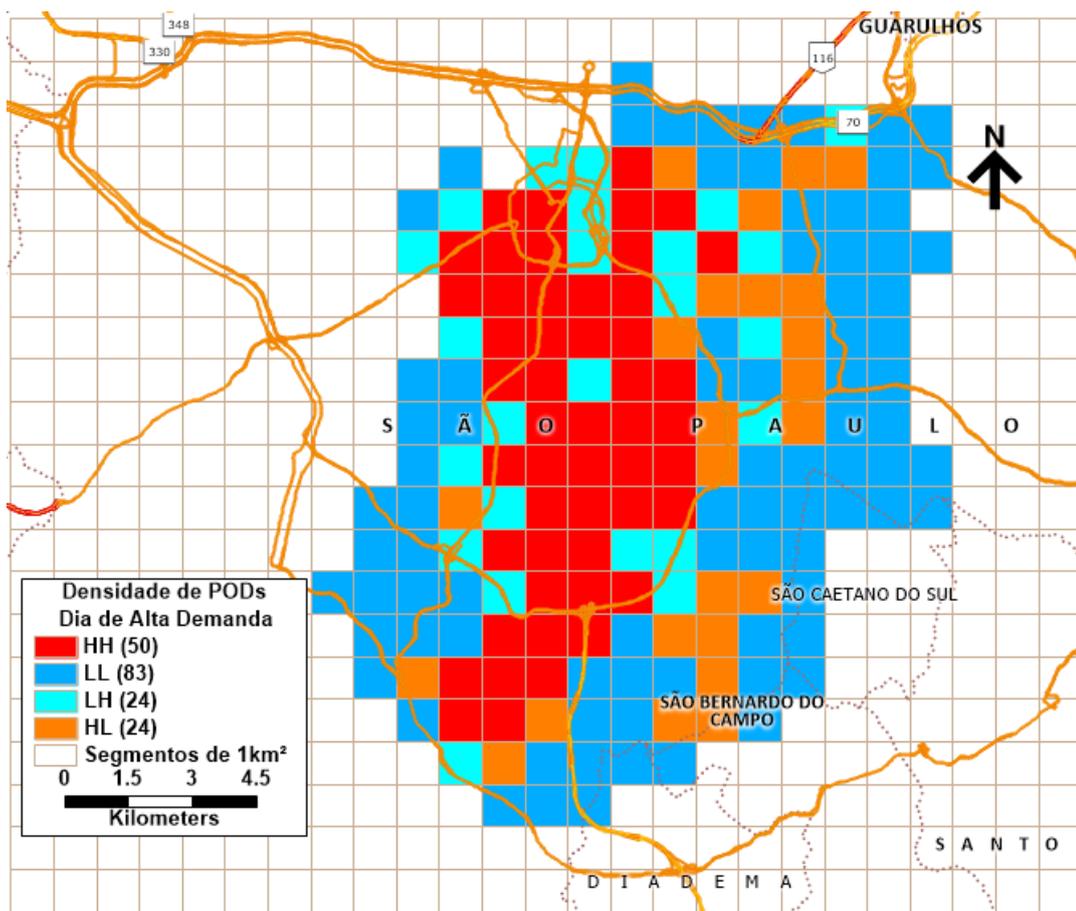


Figura 32: Box map representando a densidade de PODs nos segmentos de 1km², em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)

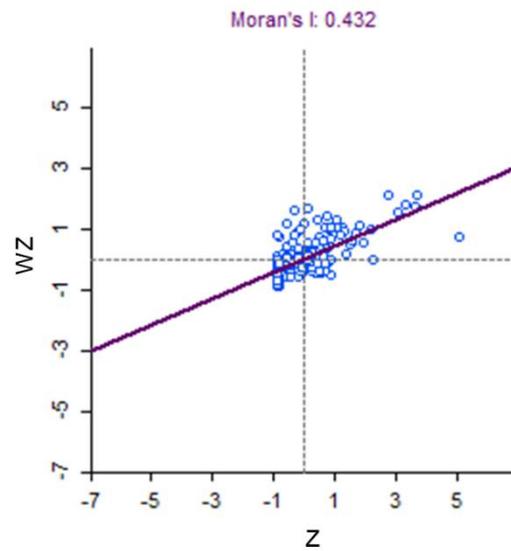


Figura 33: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 1km², em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)

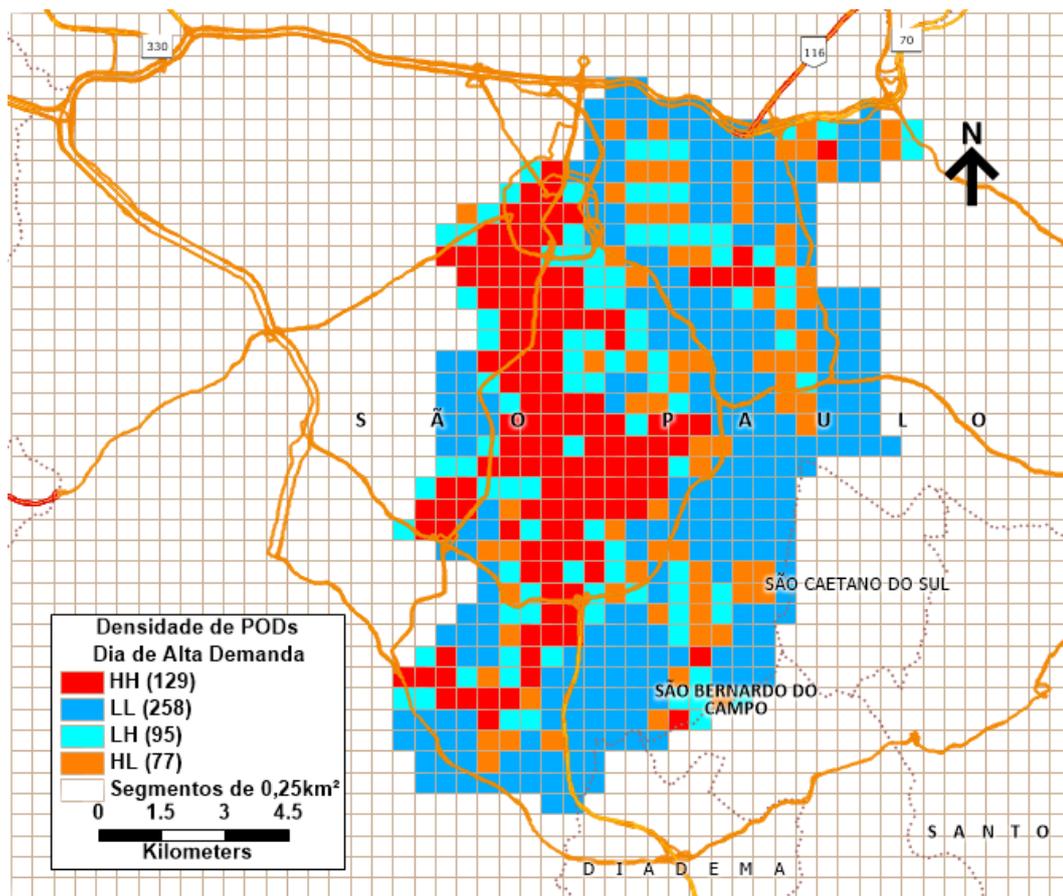


Figura 34: *Box map* representando a densidade de PODs nos segmentos de 0,25km², em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)

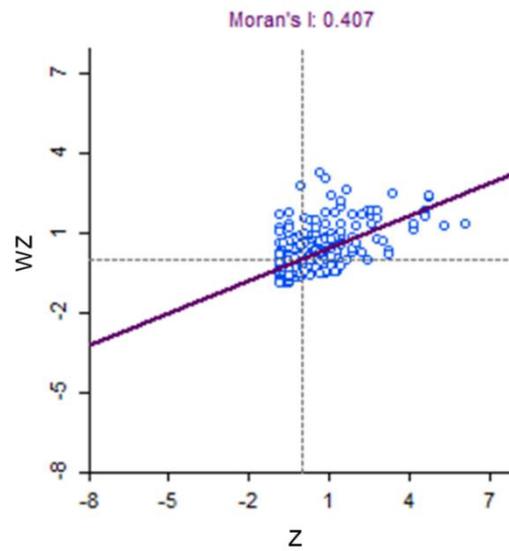


Figura 35: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 0,25km², em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)

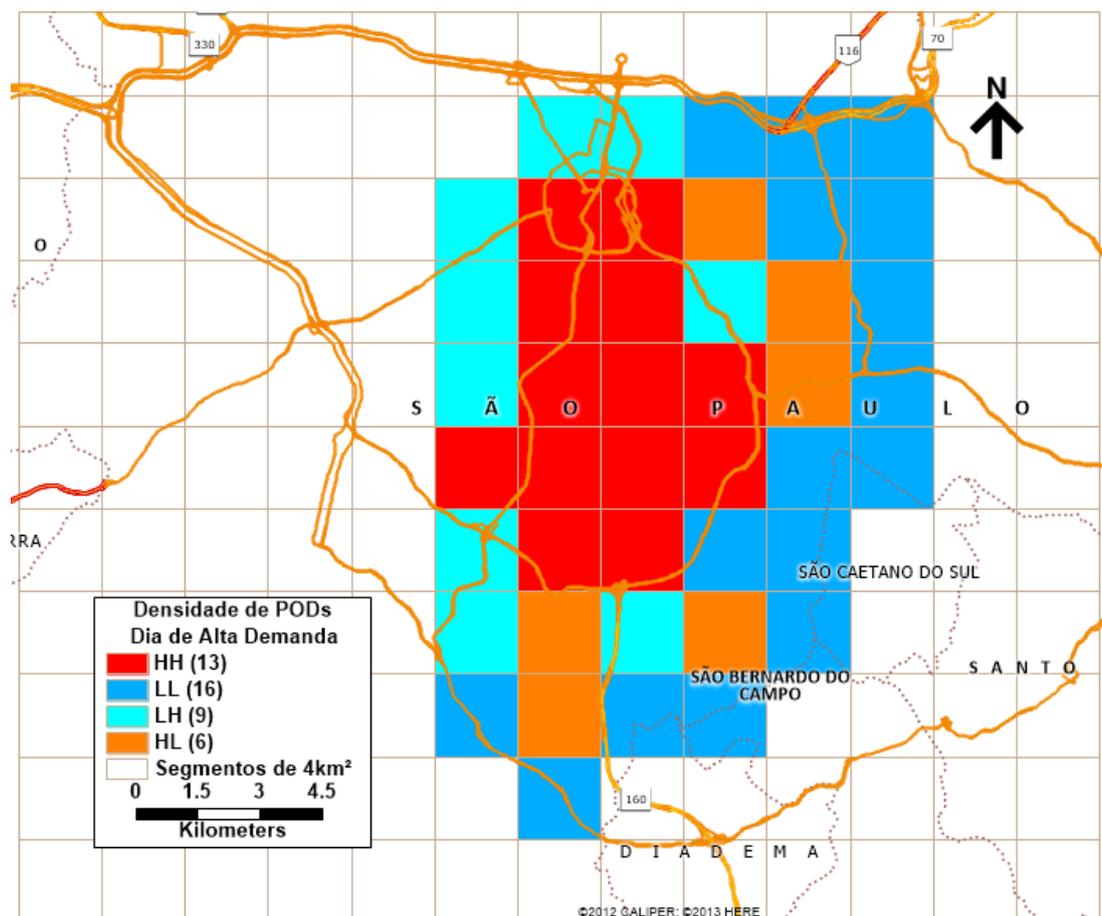


Figura 36: Box map representando a densidade de PODs nos segmentos de 4km², em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)

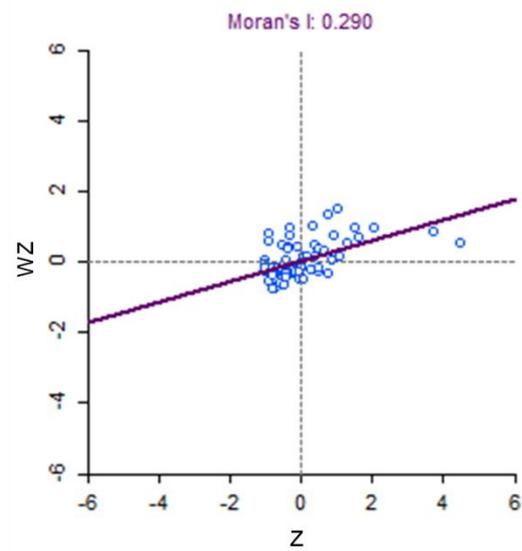


Figura 37: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 4km², em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)

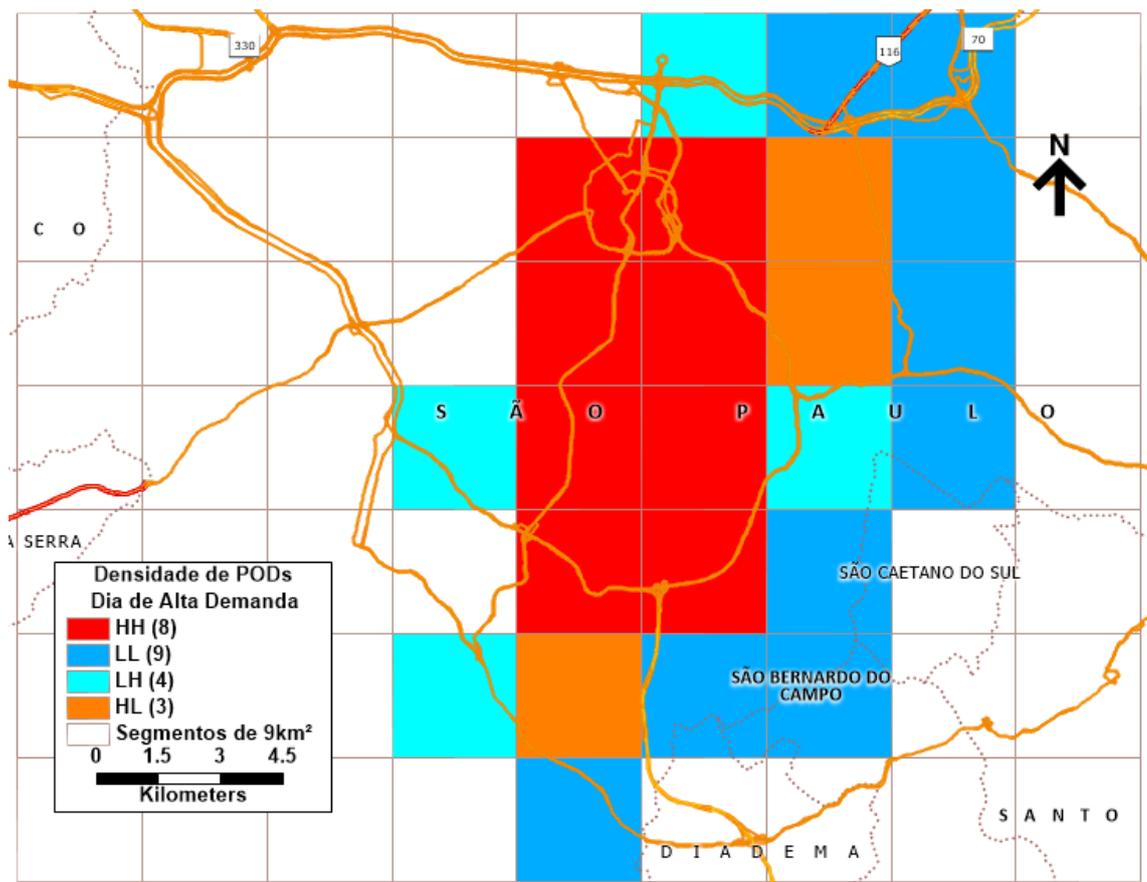


Figura 38: *Box map* representando a densidade de PODs nos segmentos de 9km², em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)

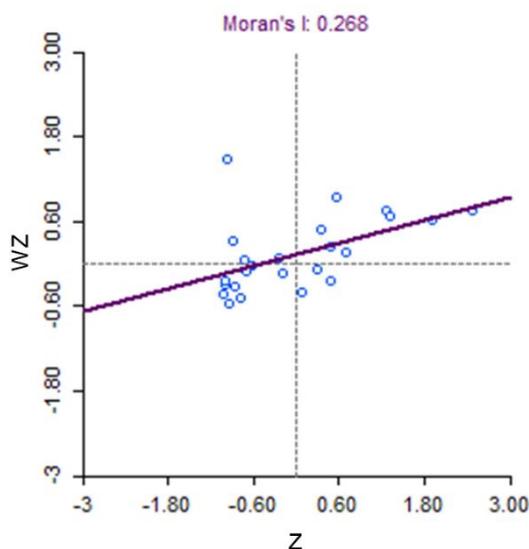


Figura 39: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 9km², em dia de alta demanda na área de serviço (elaboração própria)

Por fim, são conduzidas análises espaciais para os cenários de baixa demanda. As **Figuras 40, 41, 42 e 43** representam os resultados da análise da densidade de PODs em dia de baixa demanda, explorada para divisões administrativas, isto é, para setores censitários e para distritos urbanos. Já as **Figuras 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50 e 51** representam esse cenário para divisão em segmentos de 1km², 0,25km², 4km² e 9km², respectivamente.

De forma semelhante aos cenários de média e alta demanda, nota-se que não há regiões contínuas e homogêneas de setores censitários. Pelo gráfico de espalhamento de Moran, da **Figura 41**, constata-se a ausência de correlações, diante de um índice de Moran igual a 0,016. E pelo *box map* da **Figura 40**, nota-se a ocorrência de regiões descontínuas, com setores do quadrante “*High-high*” vizinhos a setores classificados nos quadrantes “*Low-high*” e “*Low-low*”. Também não são vistas zonas de borda compostas por setores classificados no quadrante “*High-low*”. Assim, em um cenário com demanda menor, também são encontradas regiões heterogêneas em densidade de demanda.

Para divisão em segmentos, também são encontrados resultados semelhantes aos cenários de média e de alta demanda. Mesmo para o cenário usando segmentos de 1km², em que se verifica um maior índice de Moran comparativamente às outras divisões, não são vistas zonas de borda, pelo *box map* da **Figura 44**.

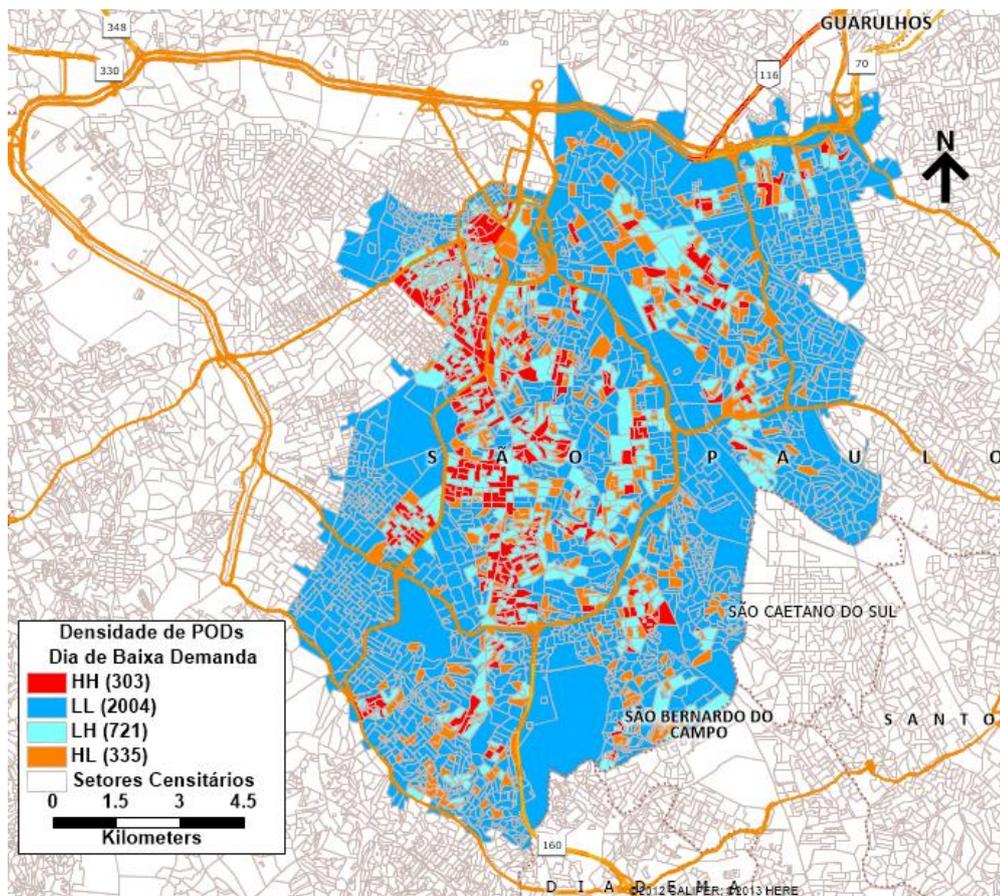


Figura 40: *Box map* representando a densidade de PODs nos setores censitários, em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)

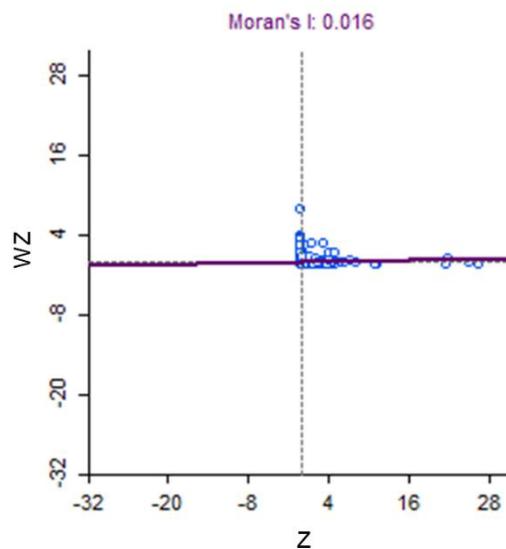


Figura 41: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos setores censitários, em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)

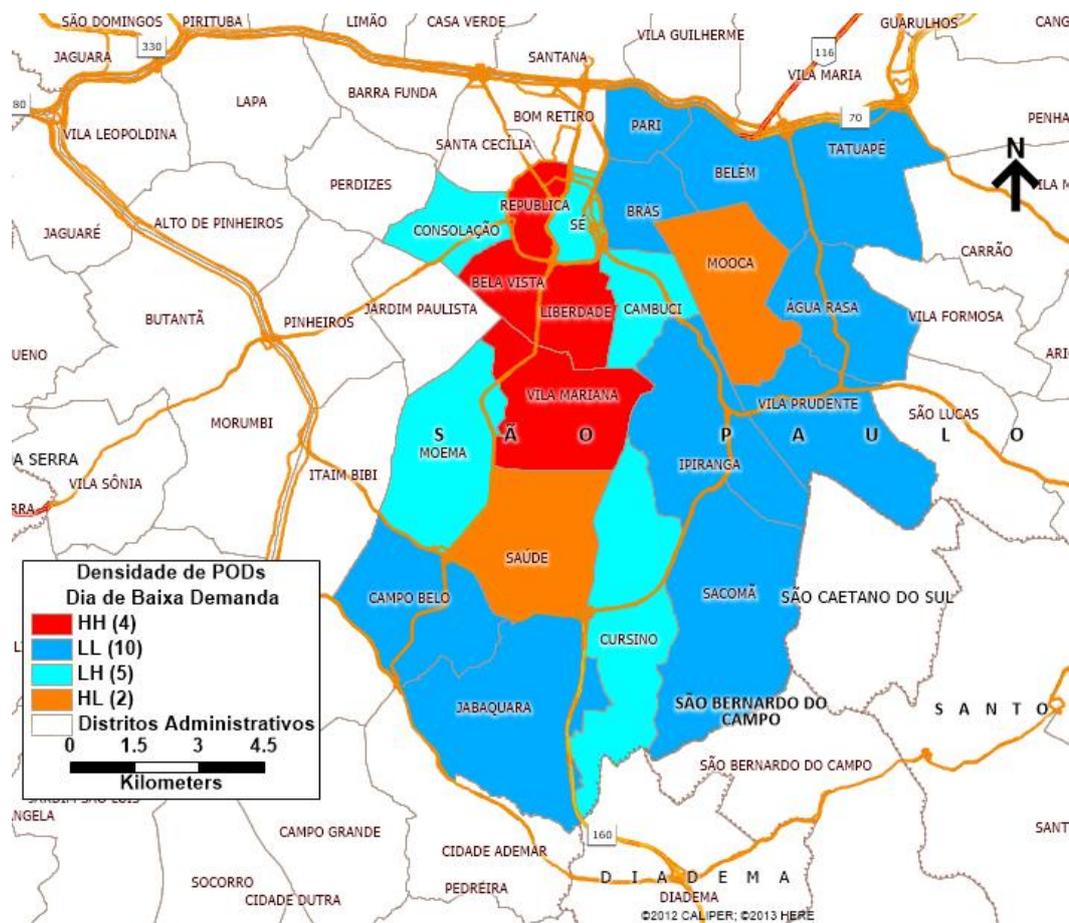


Figura 42: *Box map* representando a densidade de PODs nos distritos urbanos, em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)

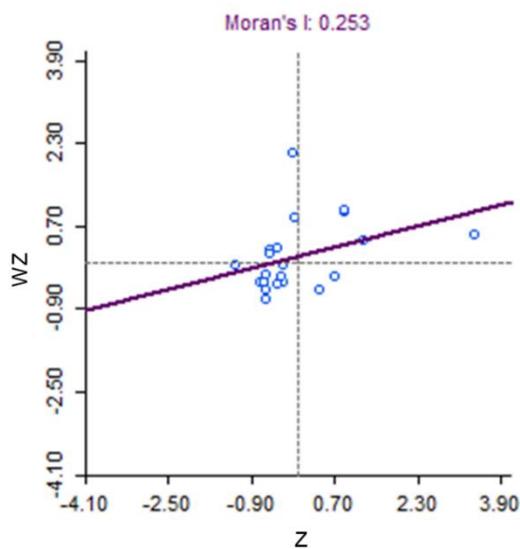


Figura 43: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos distritos urbanos, em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)

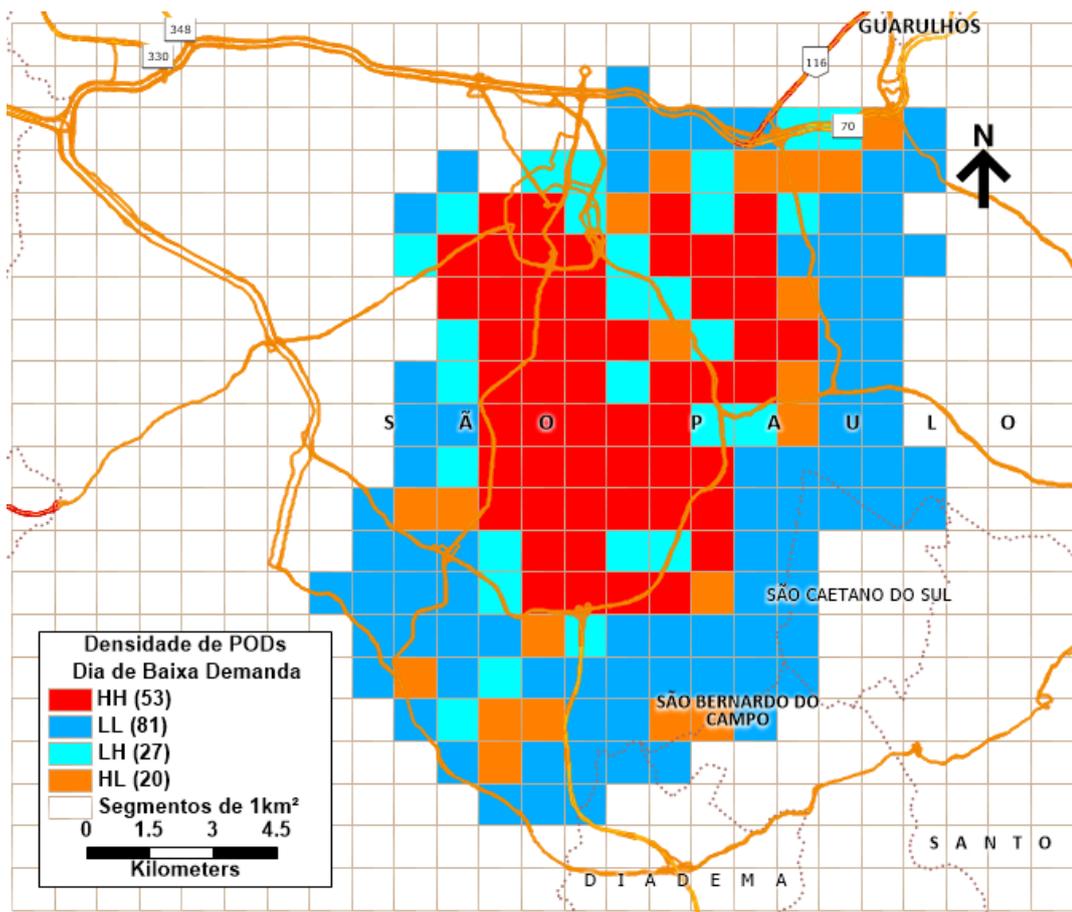


Figura 44: *Box map* representando a densidade de PODs nos segmentos de 1km², em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)

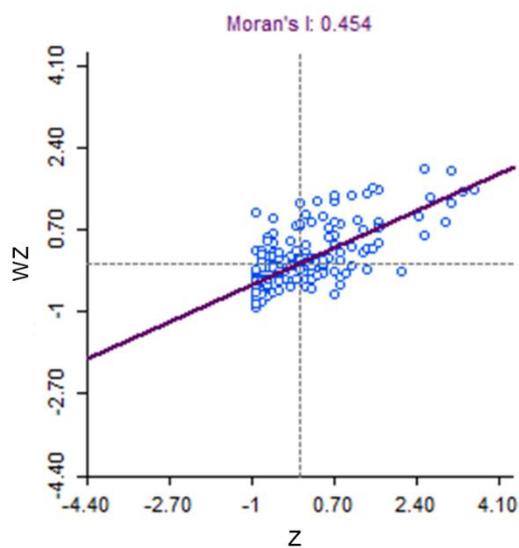


Figura 45: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 1km², em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)

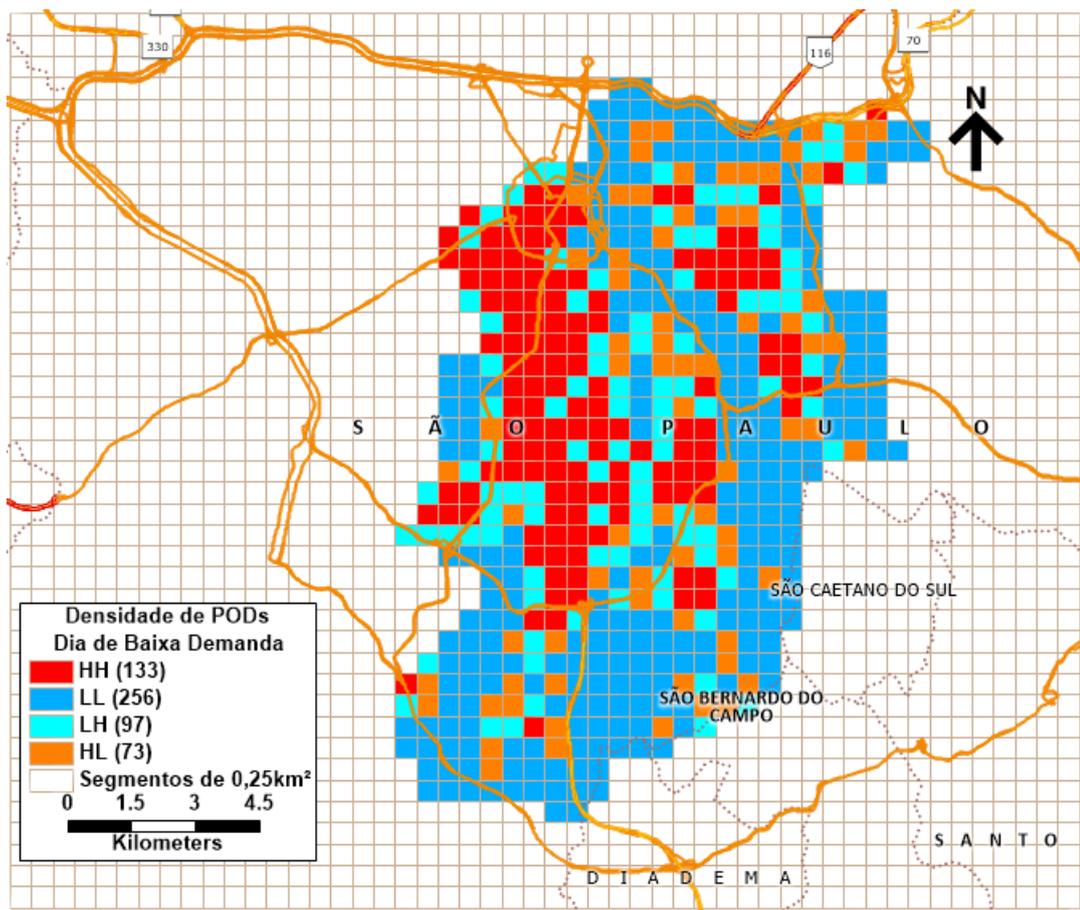


Figura 46: *Box map* representando a densidade de PODs nos segmentos de 0,25km², em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)

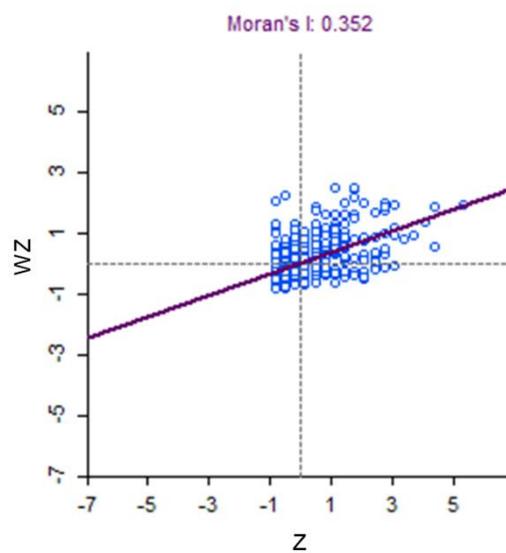


Figura 47: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 0,25km², em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)

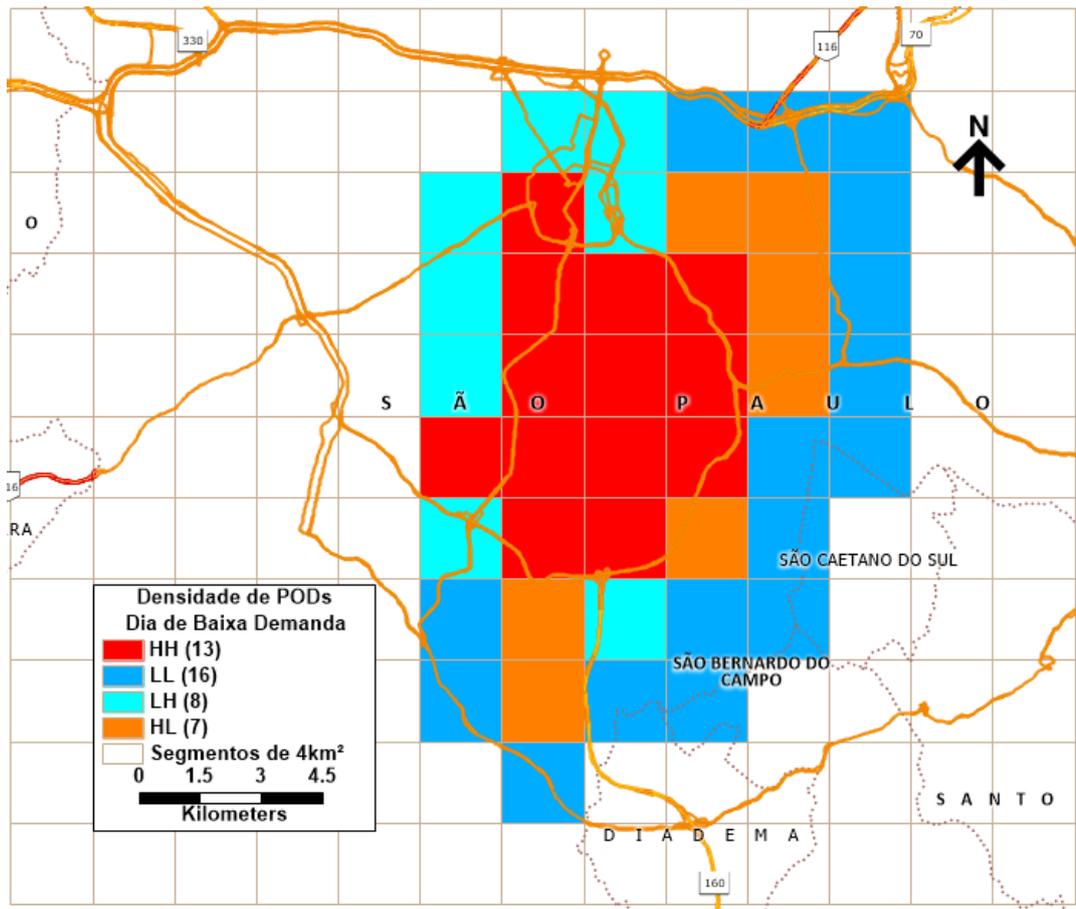


Figura 48: *Box map* representando a densidade de PODs nos segmentos de 4km², em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)

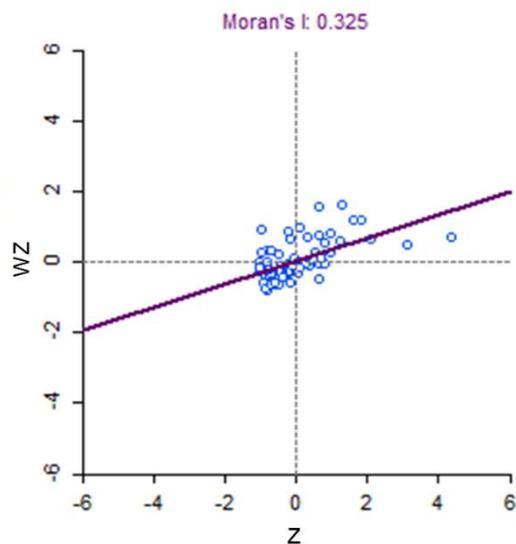


Figura 49: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 4km², em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)

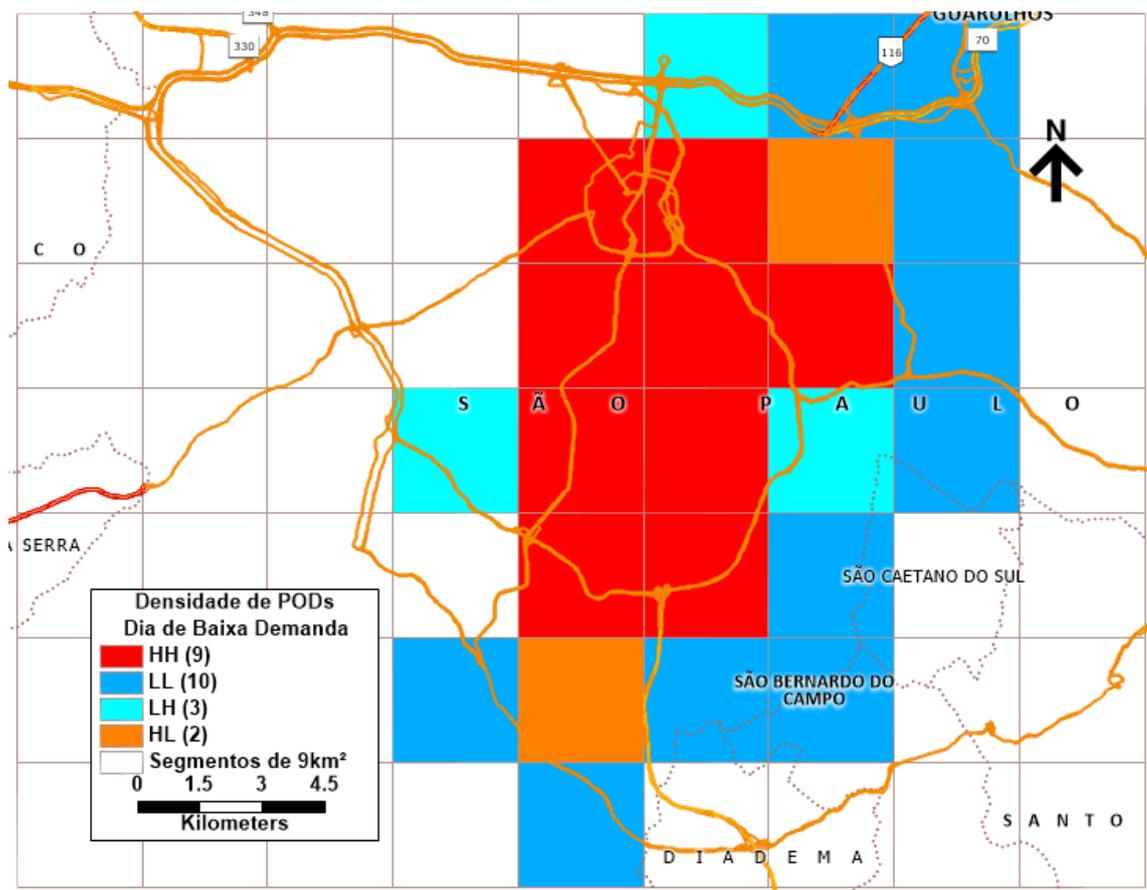


Figura 50: *Box map* representando a densidade de PODs nos segmentos de 9km², em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)

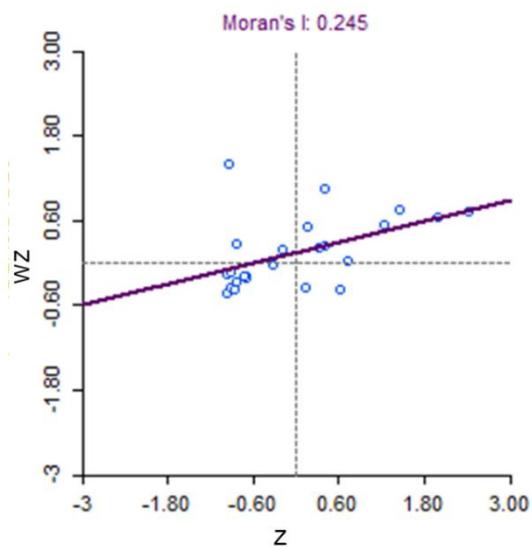


Figura 51: Gráfico de espalhamento de Moran representando a densidade de PODs nos segmentos de 9km², em dia de baixa demanda na área de serviço (elaboração própria)

Portanto, nos três cenários de demanda, são identificados comportamentos semelhantes. Embora os resultados da divisão em segmentos de 1km², de 0,25km² e em distritos urbanos mostrem correlações espaciais mais significativas, em comparação aos resultados dos outros tipos de divisão, os agrupamentos mostram descontinuidades e não há formação de zonas de bordas que permitam delinear agrupamentos contínuos de baixa e de alta demanda.

4.3 Análises Exploratórias de Dimensão de Frota e de Custos de Distribuição

A seguir são apresentados os resultados das análises de composição e dimensionamento das frotas para o estudo de caso na área de entregas. Essa análise busca responder à pergunta de pesquisa sobre os reflexos na dimensão e na composição da frota de empregar distritos logísticos variáveis. Também analisa os reflexos de empregar mais veículos não-motorizados no segundo estágio, para os custos de distribuição. E por fim, responde à pergunta de pesquisa sobre as diferenças em custos de distribuição, ao adotar cenários de distribuição em dois estágios, em comparação a distribuição em estágio único, com frota regular.

Como descrito na **Seção 3.4.3**, as frotas homogêneas de vans e bicicletas são estudadas para distribuição no segundo estágio, considerando diferentes divisões distritais. Através da formulação de aproximação contínua, tem-se a dimensão média da frota e o custo de distribuição para atender cada distrito com um dos tipos de veículos, ou seja, com vans ou com bicicletas. As divisões distritais analisadas são: distritos administrativos, setores censitários, segmentos de 1km², segmentos de 0,25km², segmentos de 4km² e segmentos de 9km². Cada distrito logístico apresenta: um *drop size* médio (ρ_k^ω), um fator de circuito local para cada tipo de veículo (κ_k^v), uma densidade média de demanda para cada cenário de demanda (γ_k^ω) e uma área de distrito (A_k). Vale destacar que o *drop size* médio é homogêneo para os distritos, pois em torno de 98% dos pedidos de entrega corresponde a 1 pacote único e peso inferior a 30kg. Os resultados dessas divisões são comparados com o resultado de considerar a área de serviço inteira com distribuição homogênea de demanda, ou seja, sem divisões em áreas menores.

As **Figuras 52 e 53** apresentam os resultados para distribuição usando frotas homogêneas de vans no segundo estágio. Os números de veículos são obtidos para cada distrito e, a partir da agregação de todos os distritos, obtém-se o número total de veículos no segundo estágio, considerando cada tipo de divisão distrital. Nesse sentido, o gráfico representado na **Figura 52**

apresenta a dimensão da frota total de vans do segundo estágio, e o gráfico representado na **Figura 53** apresenta o custo da frota total de vans no segundo estágio.

A partir da **Figura 52**, observa-se que empregar formas distintas de divisão distrital produz diferenças razoáveis no número de veículos do tipo van. As diferenças ficam em torno de 0% a 2%, comparando as dimensões de frota obtidas para as divisões em distritos urbanos e em segmentos de 1km² e de 4km², com a frota obtida para área inteira de serviço, isto é, sem divisões distritais. E comparando as dimensões obtidas para divisões em setores censitários e em segmentos de 0,25km² e 9km², com a frota obtida para área inteira de serviço, as diferenças chegam a 10%. Em termos de custos de distribuição, as diferenças chegam a 11%. Essas diferenças tendem a ser razoavelmente maiores no cenário de baixa demanda.

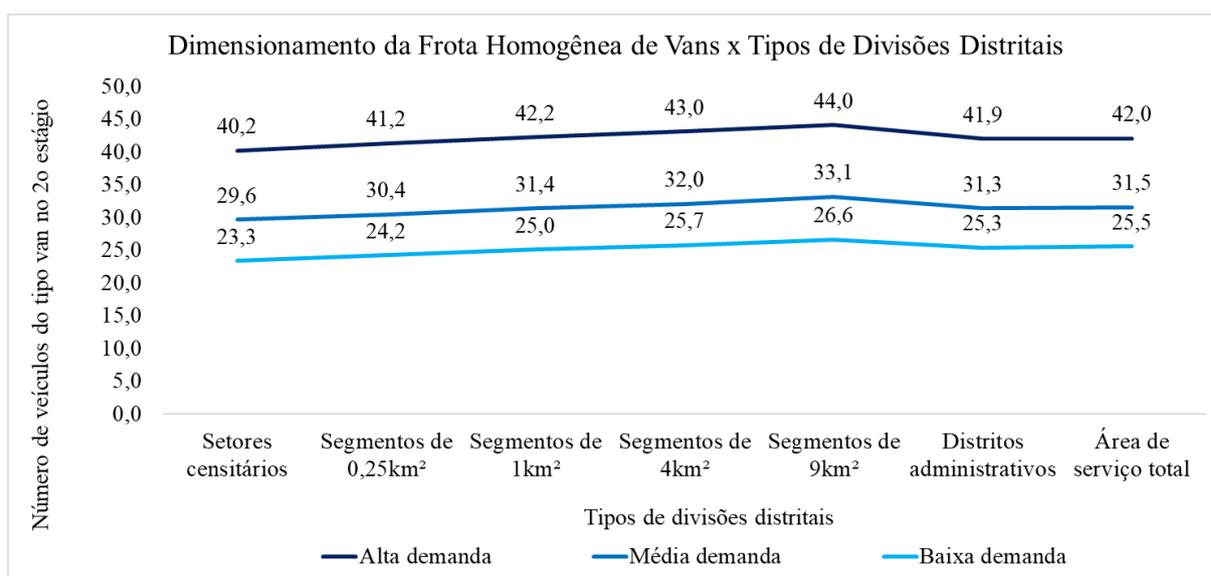


Figura 52: Gráfico da dimensão da frota homogênea de vans para atender o segundo estágio nos cenários de demanda x tipos de divisões distritais (elaboração própria)

Os números de veículos e os custos mostram uma tendência de aumento, à medida que as divisões consideram regiões de área maior. Por exemplo, a dimensão da frota obtida pela agregação dos segmentos de 9km² é maior que a dimensão da frota obtida pela agregação dos segmentos de 0,25km². Embora haja diferenças de densidade de PODs e de circulação local ao longo da área de serviço, as velocidades da frota são consideradas constantes para todos os distritos logísticos. Além disso, por se tratar de um método de aproximação com perspectiva tática, os resultados não traduzem alguns fatores operacionais que geralmente impactam a

eficiência da frota, como por exemplo diferentes níveis de congestionamentos e disponibilidade de estacionamento nas regiões. Isso significa que, na prática, a adoção de divisões distintas pode produzir mais diferenças.

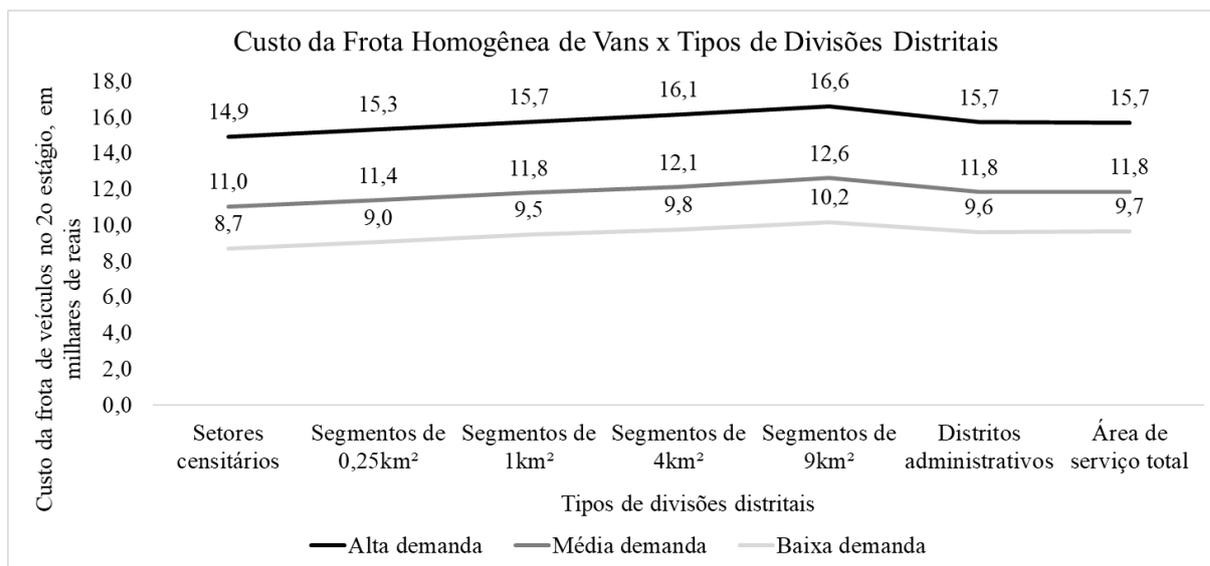


Figura 53: Gráfico do custo de distribuição da frota homogênea de vans para atender o segundo estágio nos cenários de demanda x tipos de divisões distritais (elaboração própria)

As **Figuras 54 e 55** exibem os resultados para distribuição usando frotas homogêneas de bicicletas no segundo estágio. A partir do gráfico de dimensão da frota de bicicletas, verifica-se que o uso de formas distintas de divisão distrital produz mais diferenças na dimensão da frota, comparativamente ao uso para frotas de vans. Isso porque as diferenças ficam em torno de -1% a 5%, comparando as dimensões de frota obtidas para as divisões em distritos urbanos e em segmentos de 1km² e de 4km² com a frota obtida para área inteira de serviço. E comparando as dimensões obtidas para divisões em setores censitários e em segmentos de 0,25km² e de 9km², com a frota obtida para área inteira de serviço, as diferenças chegam a 22%. Em termos de custos de distribuição, as diferenças também alcançam valores maiores, chegando a 22%. De forma similar ao que foi observado para vans, para bicicletas, as diferenças em dimensões de frota e em custos tendem a ser maiores no cenário de baixa demanda.

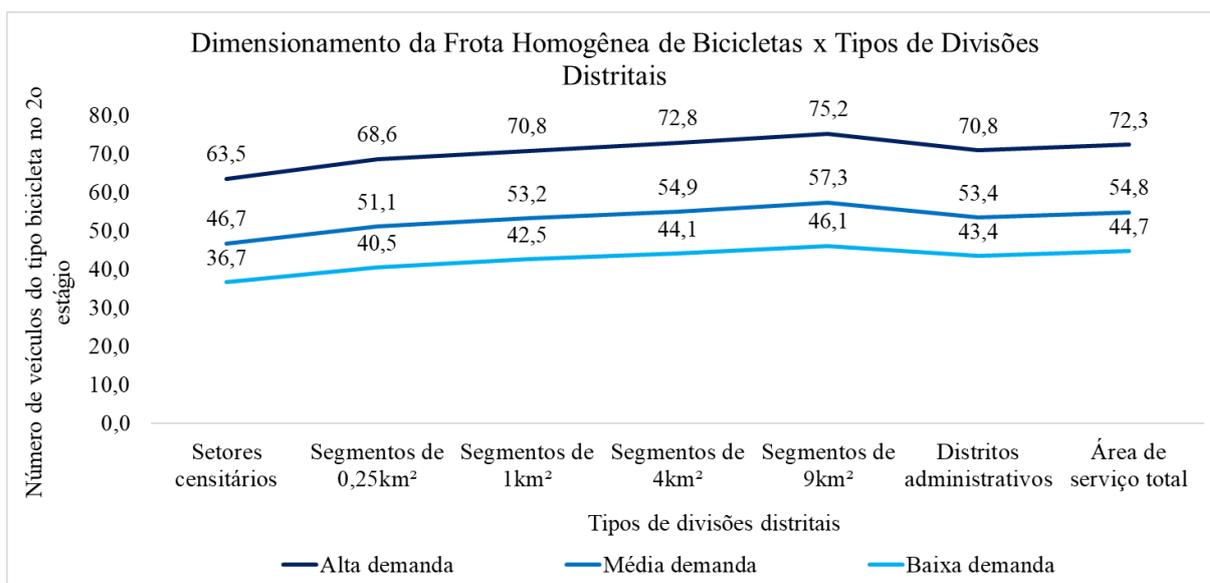


Figura 54: Gráfico da dimensão da frota homogênea de bicicletas para atender o segundo estágio nos cenários de demanda x tipos de divisões distritais (elaboração própria)

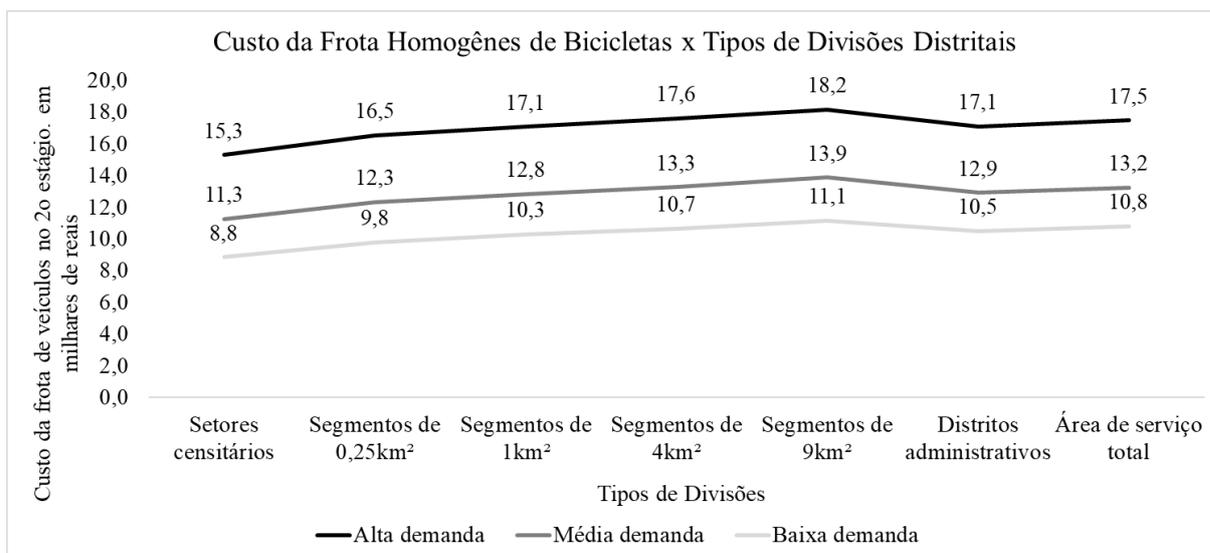


Figura 55: Gráfico do custo de distribuição da frota homogênea de bicicletas para atender o segundo estágio nos cenários de demanda x tipos de divisões distritais (elaboração própria)

Alguns motivos estão associados a obtenção de maiores diferenças para frotas homogêneas de bicicletas. As bicicletas percorrem velocidades mais baixas e apresentam menor capacidade de carga. Com isso, uma mesma bicicleta consegue fazer mais passeios durante uma

jornada máxima de serviço, se estiver servindo uma área com maior densidade de PODs. Nessa linha, o uso de divisões em áreas de proporções menores representa melhor a ocorrência de altas densidades em partes da área de serviço, como por exemplo, áreas com 92 PODs/km². Na contrapartida, adotar a área de serviço inteira leva a obtenção de uma densidade média de PODs relativamente baixa, isto é, entre 8 e 16 PODs/ km², e também a consideração de áreas da zona de serviço em que não há entregas.

Essas análises de dimensões e custos de frotas de vans e bicicletas no segundo estágio também são efetuadas considerando distâncias de *line-haul* diferentes das reais. O **Anexo B** traz os resultados considerando as distâncias entre o satélite e os distritos nulas e equivalentes a 50% das distâncias de *line-haul* reais. A premissa para distâncias de *line-haul* iguais a zero leva em conta a situação de ter instalações satélite em todos os distritos, e a premissa para distâncias de *line-haul* equivalentes 50% das reais leva em conta a situação de ter dois satélites na área de entrega, ao invés de um único. Esses resultados são gerados, com objetivo de verificar se ocorre a mesma tendência de aumento da dimensão da frota, à medida que se emprega distritos de maiores dimensões. E nota-se que, em ambas as situações, o comportamento é de crescimento da dimensão da frota para adoção de divisões em áreas maiores.

Outro aspecto observado ao usar diferentes divisões para encontrar o número de veículos é que algumas divisões podem trazer maior praticidade para designar os veículos. Nos *boxplots* das **Figuras 56, 57 e 58** é possível verificar o número médio de veículos do tipo van necessário para atender um distrito logístico, considerando cada tipo de divisão distrital, em três diferentes cenários de demanda. Observa-se que ao calcular o número de veículos para atender cada setor censitário ou para atender cada segmento de 0,25km², geralmente, encontra-se uma quantidade muito menor que 1 veículo, como por exemplo, 0,03 veículos. Por outro lado, ao calcular o número de veículos para atender cada segmento de 9km² ou para atender cada distrito urbano, geralmente, encontra-se uma quantidade maior que 1 veículo, como por exemplo, 2 veículos. E ao calcular o número de veículos para atender cada segmento de 1km² e de 4km², geralmente, encontra-se uma quantidade 0,2 veículos a 0,8 veículos. Depreende-se, assim, que seria pouco prático efetuar a designação de veículos usando as divisões em setores censitários e em segmentos de 0,25km², pois seria necessário fazer agregações dessas áreas.

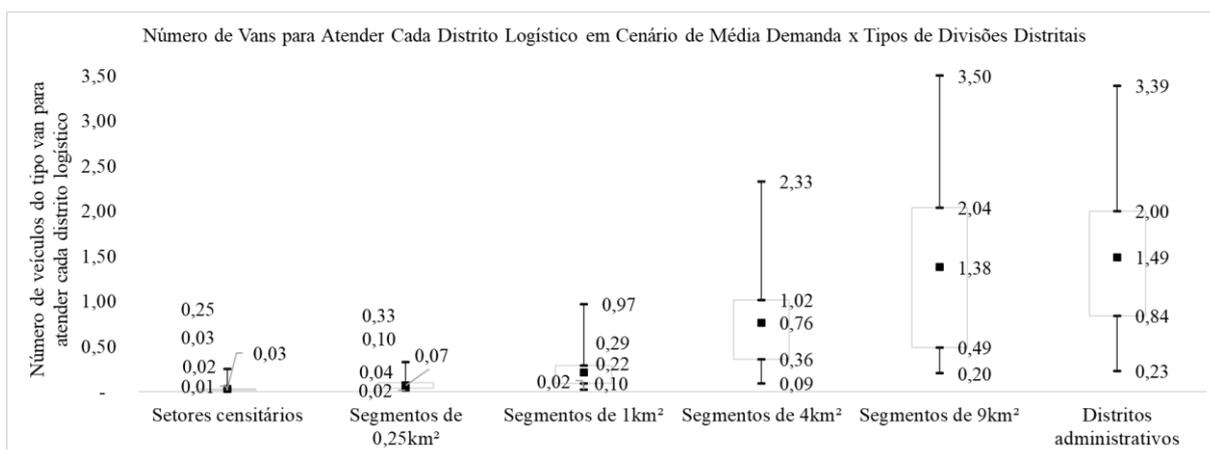


Figura 56: *Boxplot* do número de vans necessário para atender cada parte do território de entrega, considerando diferentes tipos de divisões distritais, em cenário de média demanda (elaboração própria)

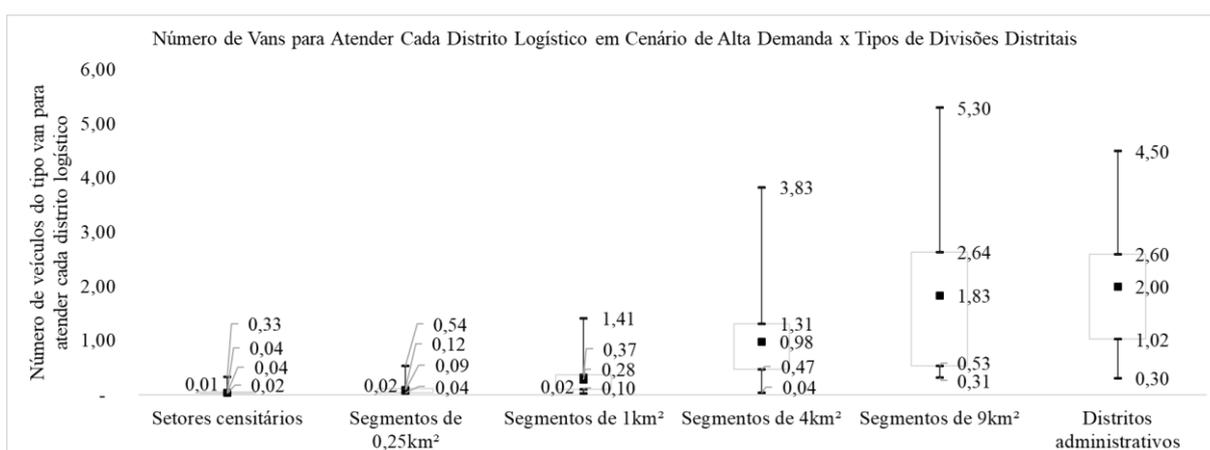


Figura 57: *Boxplot* do número de vans necessário para atender cada parte do território de entrega, considerando diferentes tipos de divisões distritais, em cenário de alta demanda (elaboração própria)

No caso das bicicletas, as melhores divisões para designar veículos também são segmentos de 1km² e 4km². Nos *boxplots* das **Figuras 59, 60 e 61**, visualiza-se os números de veículos do tipo bicicleta necessários para atender cada distrito logístico, em diferentes cenários de demanda. Ao calcular o número de veículos para atender cada setor censitário ou para atender cada segmento de 0,25km², geralmente, encontra-se uma quantidade muito menor que 1 veículo, como por exemplo, 0,05 veículos. Por outro lado, ao calcular o número de veículos para atender cada segmento de 9km² ou para atender cada distrito urbano, geralmente, encontra-

se uma quantidade maior que 1 veículo, como por exemplo, 3 veículos. E ao calcular o número de veículos para atender cada segmento de 1km² e de 4km², geralmente, encontra-se uma quantidade 0,4 veículos a 1,7 veículos. Depreende-se, assim, que também não seria prático efetuar a designação de veículos usando as divisões em setores censitários e em segmentos de 0,25km², pois seria necessário fazer muitos agrupamentos dessas áreas.

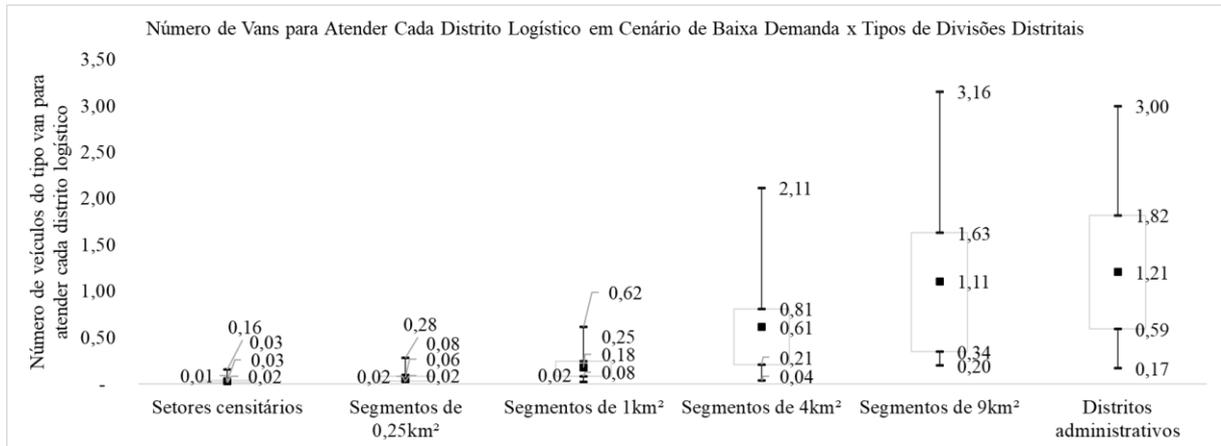


Figura 58: *Boxplot* do número de vans necessário para atender cada parte do território de entrega, considerando diferentes tipos de divisões distritais, em cenário de baixa demanda (elaboração própria)

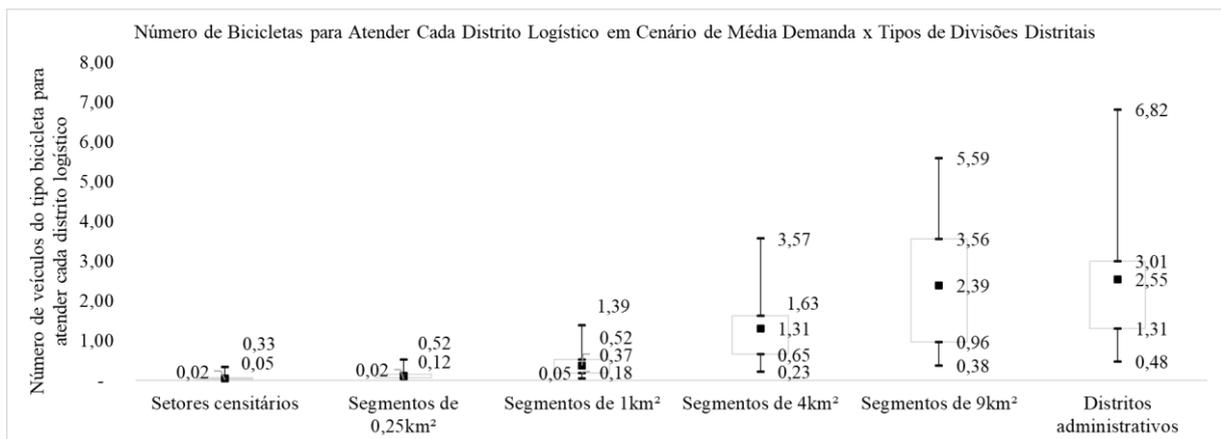


Figura 59: *Boxplot* do número de bicicletas necessário para atender cada parte do território de entrega, considerando diferentes tipos de divisões, em cenário de média demanda (elaboração própria)

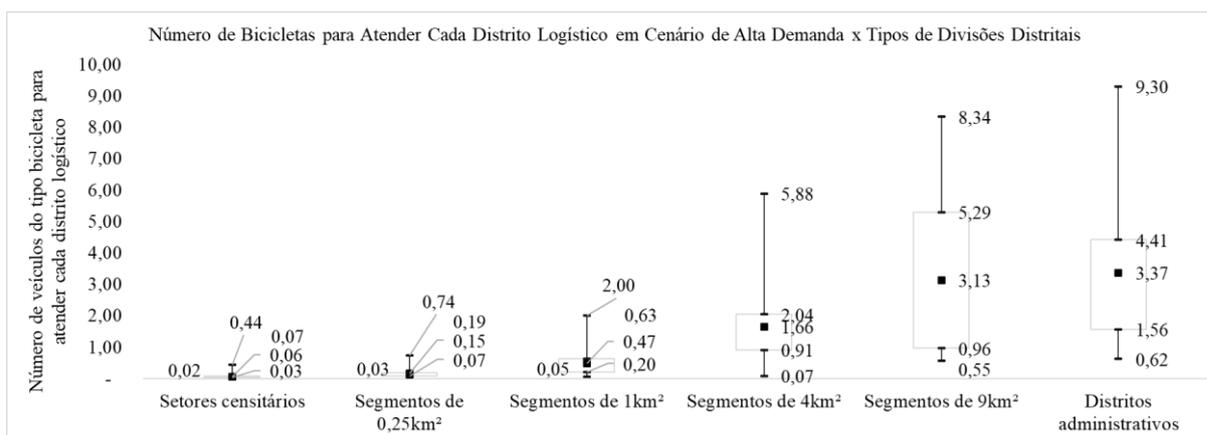


Figura 60: *Boxplot* do número de bicicletas necessário para atender cada parte do território de entrega, considerando diferentes tipos de divisões, em cenário de alta demanda (elaboração própria)

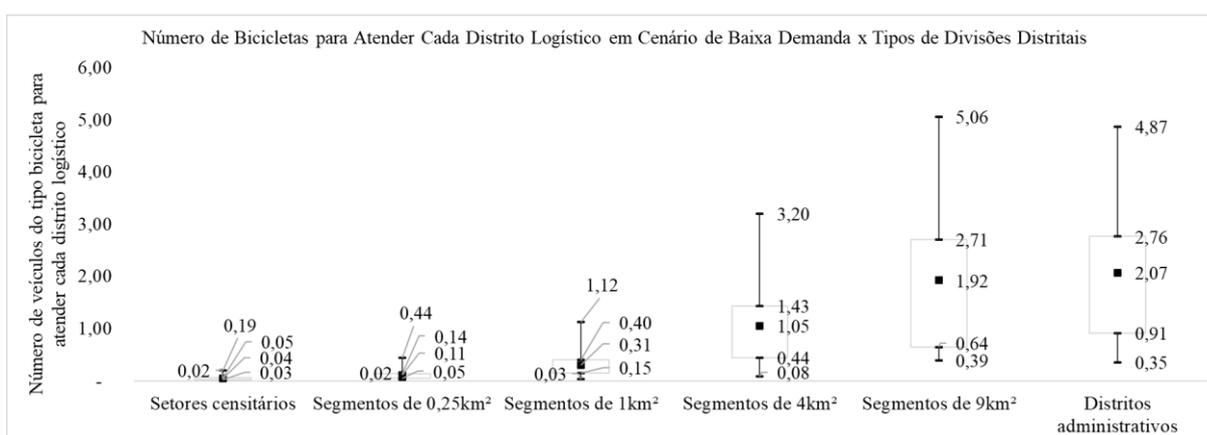


Figura 61: *Boxplot* do número de bicicletas necessário para atender cada parte do território de entrega, considerando diferentes tipos de divisões, em cenário de baixa demanda (elaboração própria)

Como descrito na **Seção 3.4.3**, também são estudados cenários de distribuição com frotas heterogêneas no segundo estágio. Através da formulação de aproximação contínua, tem-se a dimensão média da frota e o custo de distribuição para atender cada distrito com um dos tipos de veículos, ou seja, com vans ou com bicicletas. Para designar o atendimento de cada distrito logístico para frota de bicicletas ou de vans, utiliza-se a formulação de programação linear inteira. Com isso, é possível encontrar as designações ótimas, usando os diferentes tipos de

divisões, isto é, em distritos administrativos, em setores censitários, em segmentos de 1km², em segmentos de 4km², em segmentos de 0,25km² e em segmentos de 9km².

As **Figuras 62, 63 e 64** apresentam os resultados da designação da frota heterogênea no segundo estágio, usando a divisão distrital em segmentos de 1km². Nos três cenários de demanda, observa-se uma distribuição semelhante dos segmentos, com aproximadamente 76% sendo atendidos por vans e 24% por bicicletas. Nota-se também uma concentração maior de segmentos atendidos por bicicletas ao norte e leste da área de serviço, que são as regiões mais próximas do satélite, que fica localizado na região nordeste da área de serviço. Fica evidente que a distância de *line-haul* entre o distrito logístico e o satélite é o fator que mais influencia o desempenho e eficiência da frota de bicicletas.

Outro aspecto importante observado nas **Figuras 62, 63 e 64** é a influência das densidades de PODs na designação. Alguns segmentos na região central, norte e leste são designados para atendimento por vans, embora tenham distância próxima até o satélite. Esses segmentos se distinguem dos segmentos próximos, que são designados para atendimento por frota de bicicletas. Em geral, esses segmentos discrepantes apresentam densidades mais baixas, comparativamente aos segmentos vizinhos.

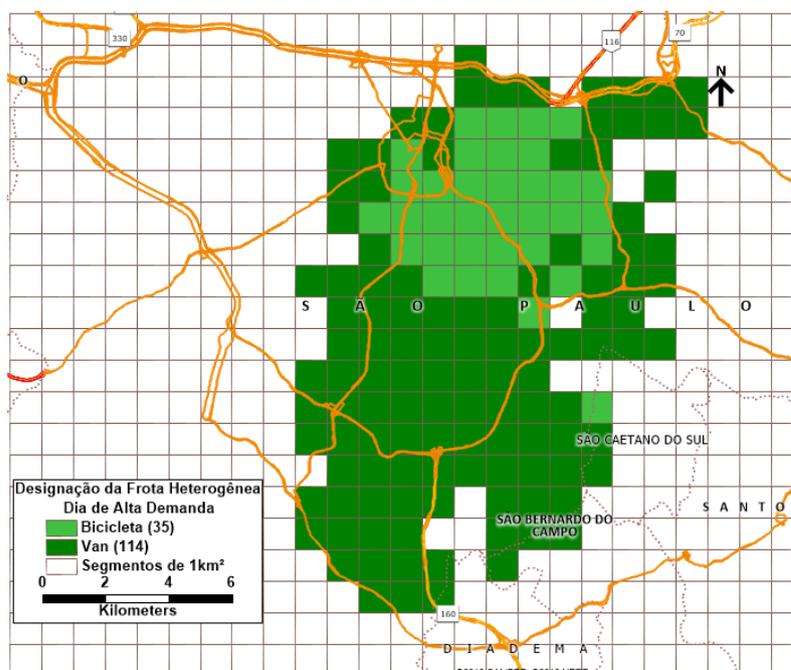


Figura 62: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 1km² em dia de alta demanda (elaboração própria)

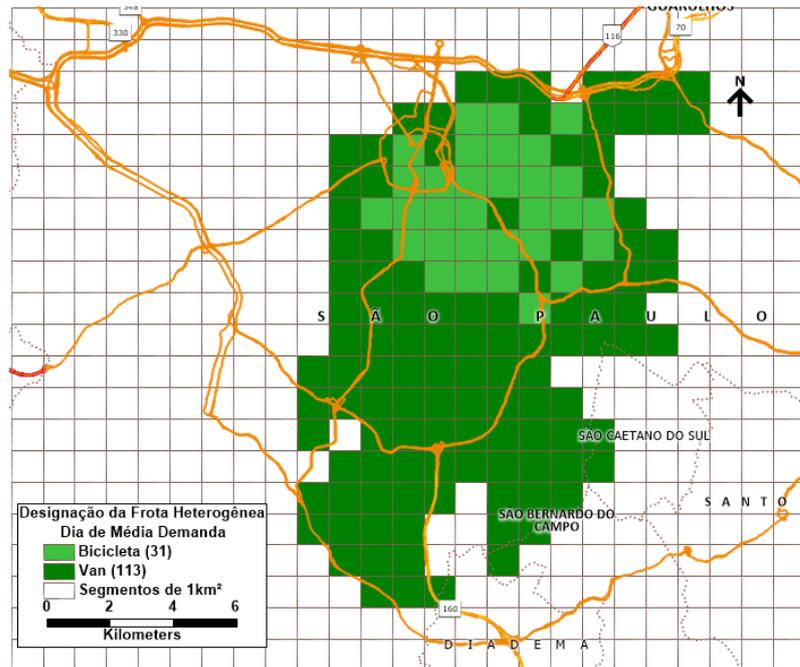


Figura 63: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 1km² em dia de média demanda (elaboração própria)

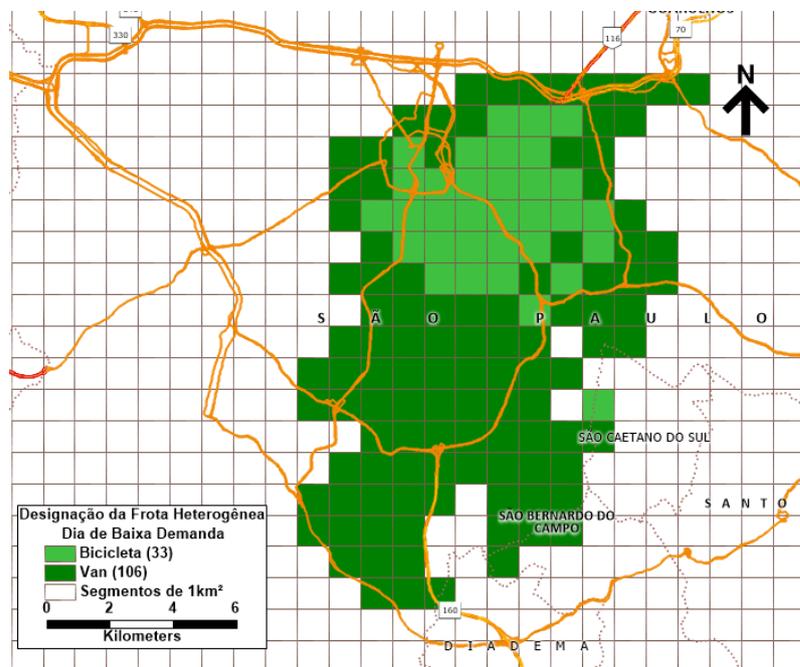


Figura 64: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 1km² em dia de baixa demanda (elaboração própria)

As **Figuras 65 a 73** apresentam os resultados da designação da frota heterogênea no segundo estágio, para as demais divisões distritais em segmentos de tamanho regular. Para as três divisões, observa-se uma concentração maior de segmentos atendidos por bicicletas ao norte da área de serviço, que são regiões mais próximas do satélite. Vale observar que para grade de segmentos de $0,25\text{km}^2$, representada nas **Figuras 71, 72 e 73**, alguns segmentos no centro da região de serviço também são designados para serem atendidos por bicicleta.

Com relação a designação de atendimento para veículos do tipo bicicleta, as distribuições são maiores para divisões distritais em segmentos de menor área. No caso da grade de segmentos de 4km^2 , representada nas **Figuras 65, 66 e 67**, a designação para veículos do tipo bicicleta fica entre 14% a 20%. Já no caso da grade de segmentos de 9km^2 , representada nas **Figuras 68, 69 e 70**, a designação para veículos do tipo bicicleta fica entre 8% a 13%. E no caso da grade de segmentos de $0,25\text{km}^2$, representada nas **Figuras 71, 72 e 73**, a designação para veículos do tipo bicicleta fica em torno de 28%.

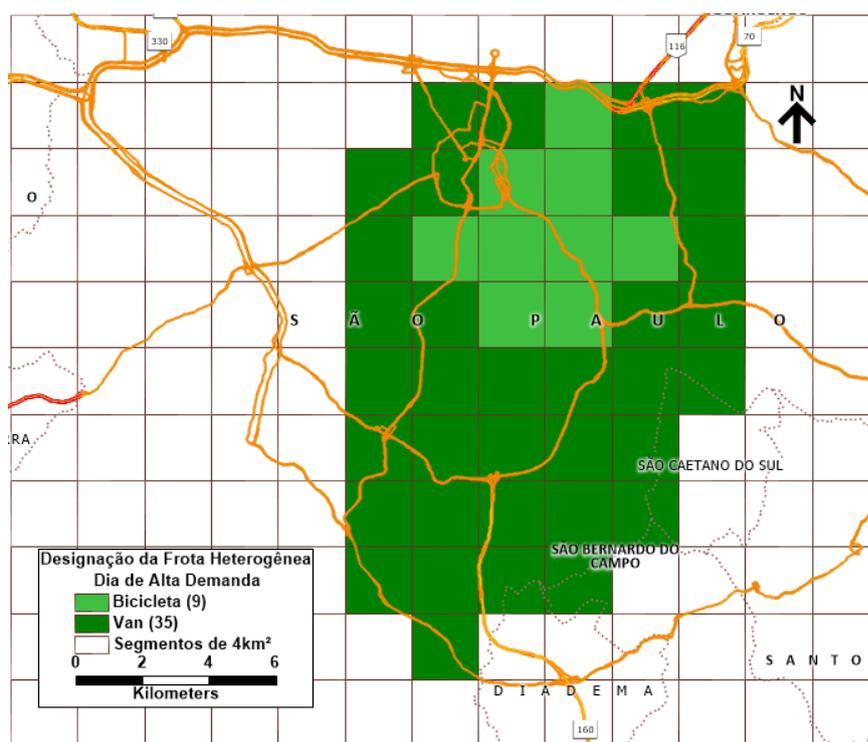


Figura 65: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 4km^2 em dia de alta demanda (elaboração própria)

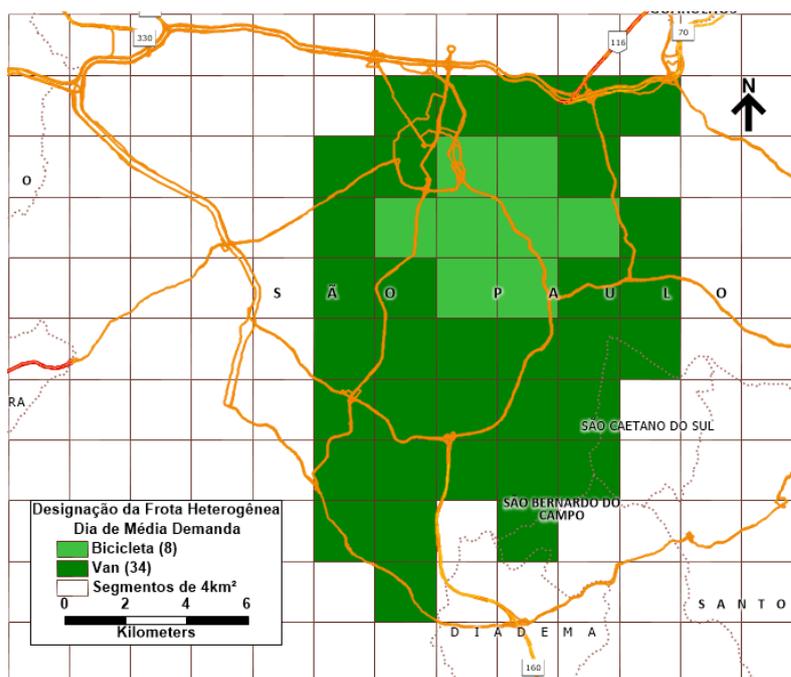


Figura 66: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 4km² em dia de média demanda (elaboração própria)

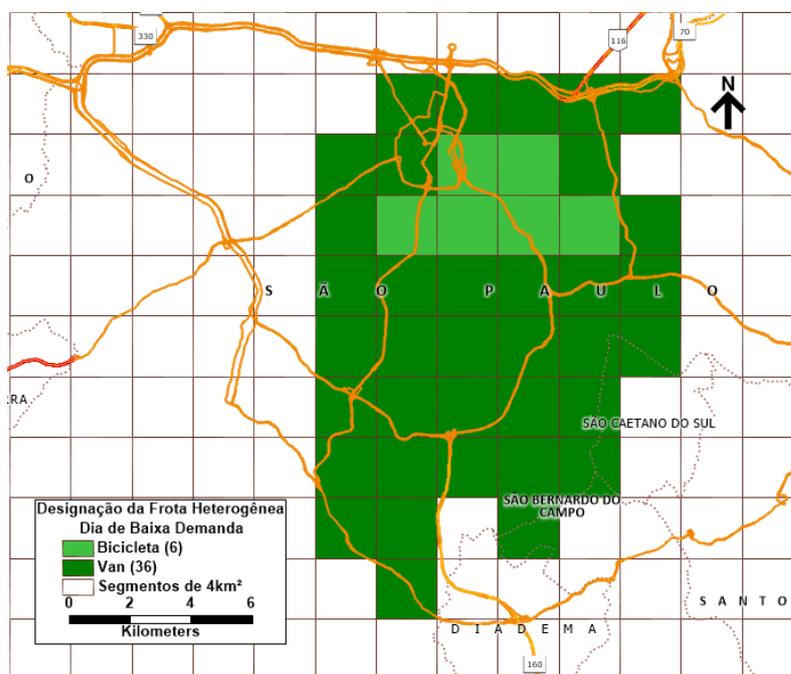


Figura 67: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 4km² em dia de baixa demanda (elaboração própria)

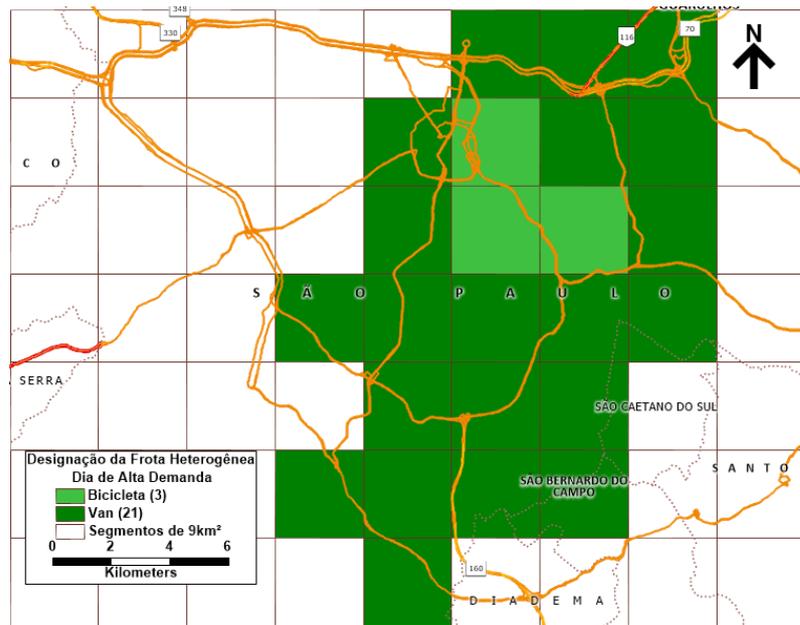


Figura 68: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 9km² em dia de alta demanda (elaboração própria)

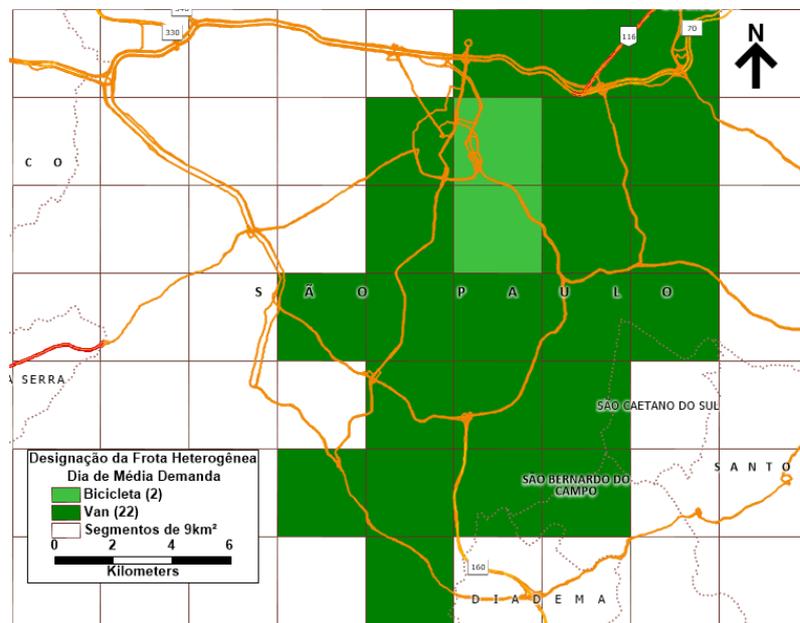


Figura 69: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 9km² em dia de média demanda (elaboração própria)

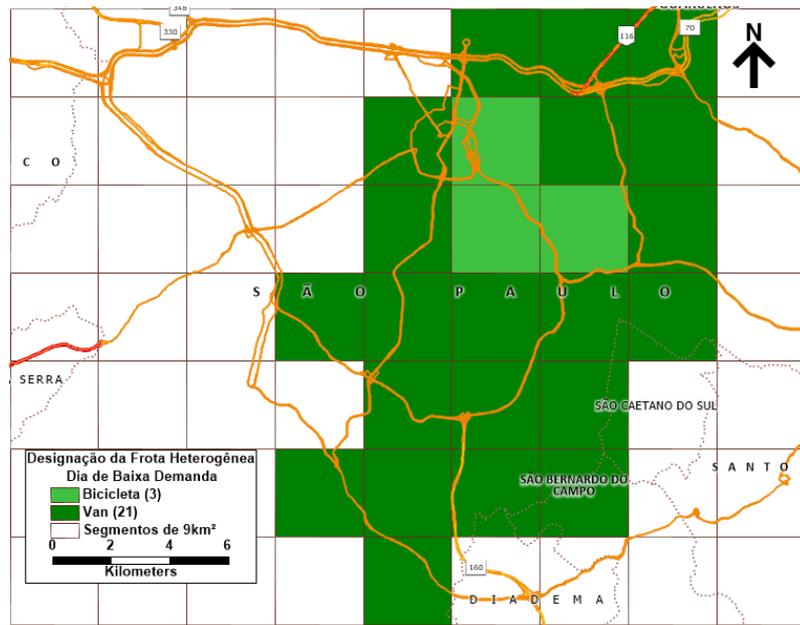


Figura 70: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 9km² em dia de baixa demanda (elaboração própria)

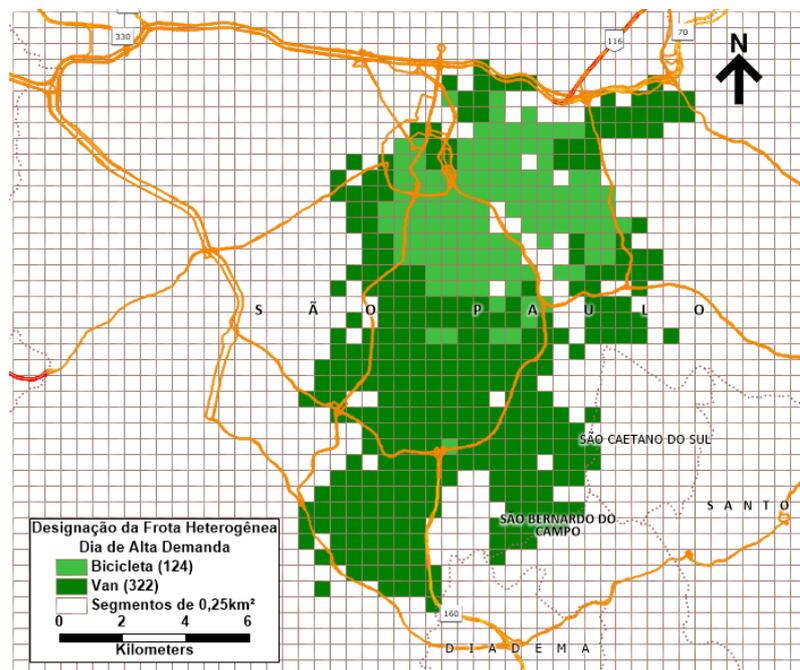


Figura 71: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 0,25km² em dia de alta demanda (elaboração própria)

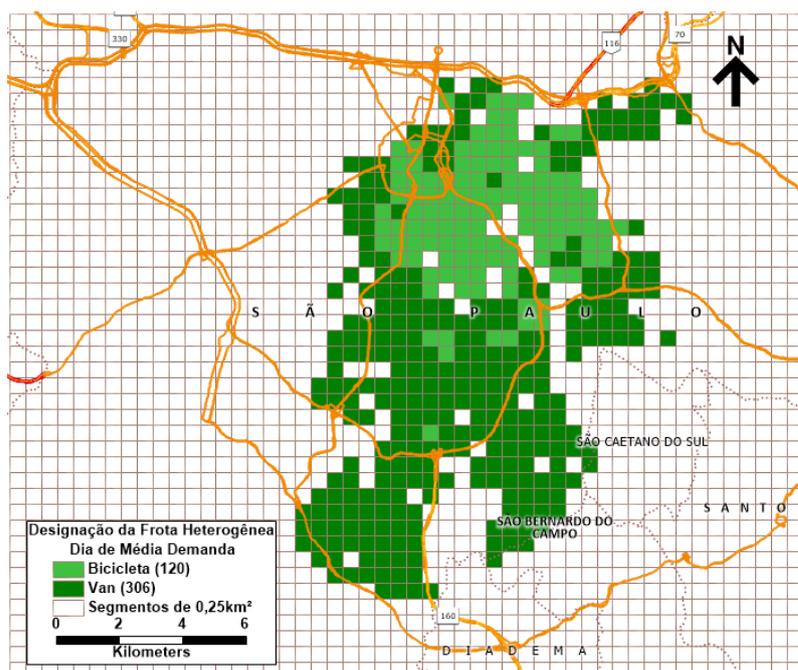


Figura 72: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 0,25km² em dia de média demanda (elaboração própria)

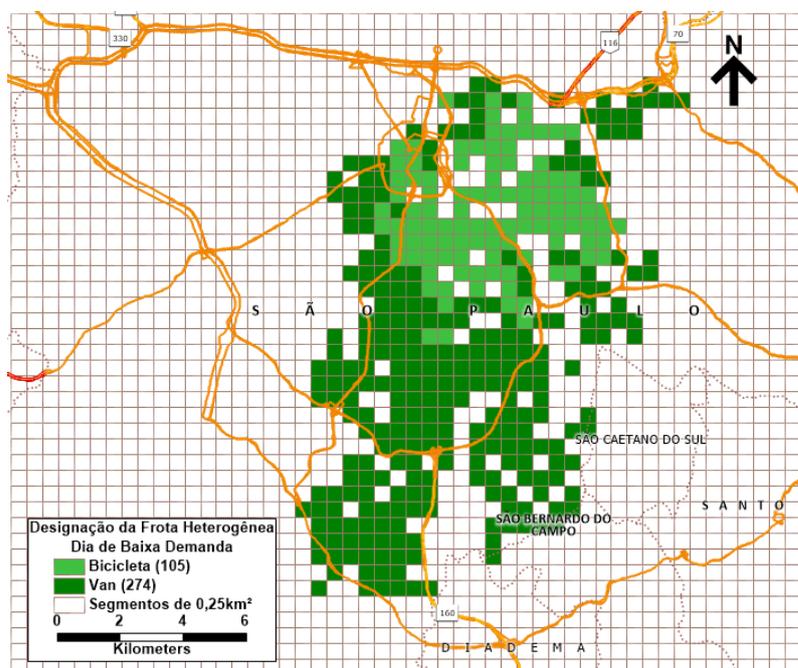


Figura 73: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 0,25km² em dia de baixa demanda (elaboração própria)

As **Figuras 74, 75 e 76** trazem os resultados da designação da frota heterogênea no segundo estágio, usando a divisão em distritos administrativos. Nos três cenários de demanda, nota-se uma mesma distribuição de atendimento dos distritos, com 71% designados para frota de vans e 29% para frota de bicicletas. Nota-se também a concentração de distritos atendidos por bicicletas ao norte da área de serviço, que são as regiões próximas do satélite. Assim como para divisão em segmentos, a divisão em distritos administrativos evidencia a influência da distância de *line-haul* na eficiência da frota de bicicletas e, portanto, na designação da frota heterogênea.

E as **Figuras 77, 78 e 79** trazem os resultados da designação da frota heterogênea no segundo estágio, usando a divisão em setores censitários. Nos três cenários de demanda, nota-se uma distribuição de atendimento dos distritos semelhante, com aproximadamente 55% designados para frota de vans e 45% para frota de bicicletas. Apesar das descontinuidades, nota-se também uma quantidade maior de setores atendidos por bicicletas ao norte e no centro da área de serviço, que são regiões próximas do satélite.

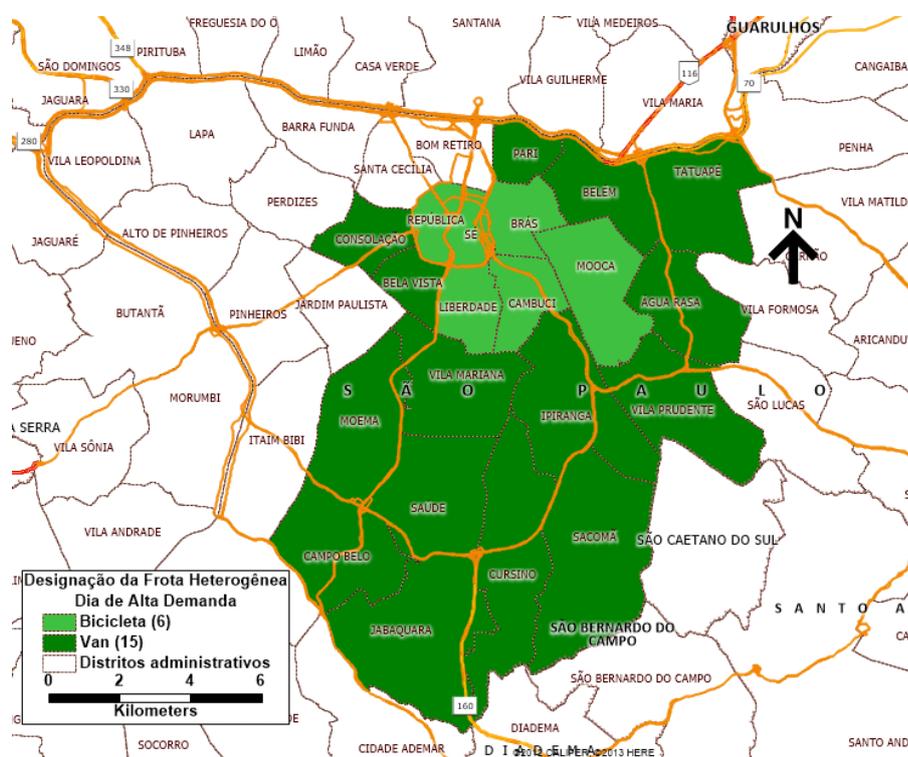


Figura 74: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos distritos administrativos em dia de alta demanda (elaboração própria)

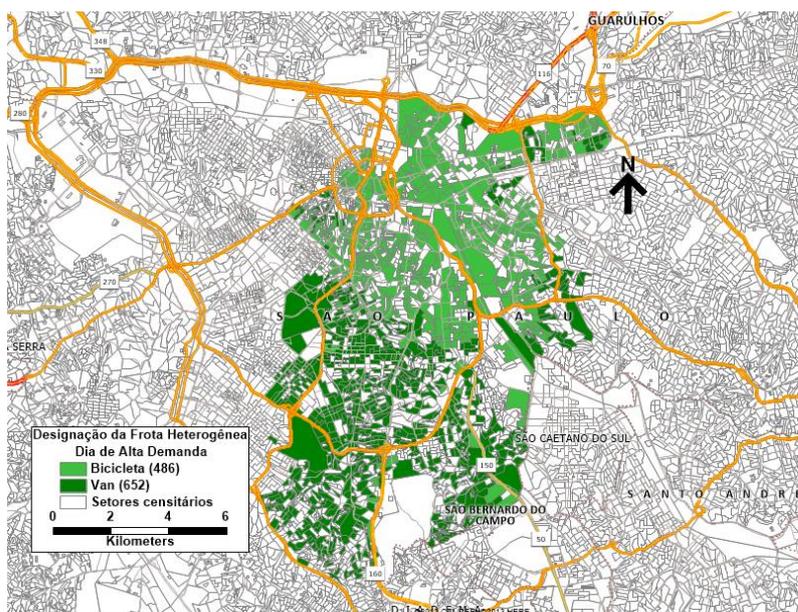


Figura 77: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos setores censitários em dia de alta demanda (elaboração própria)

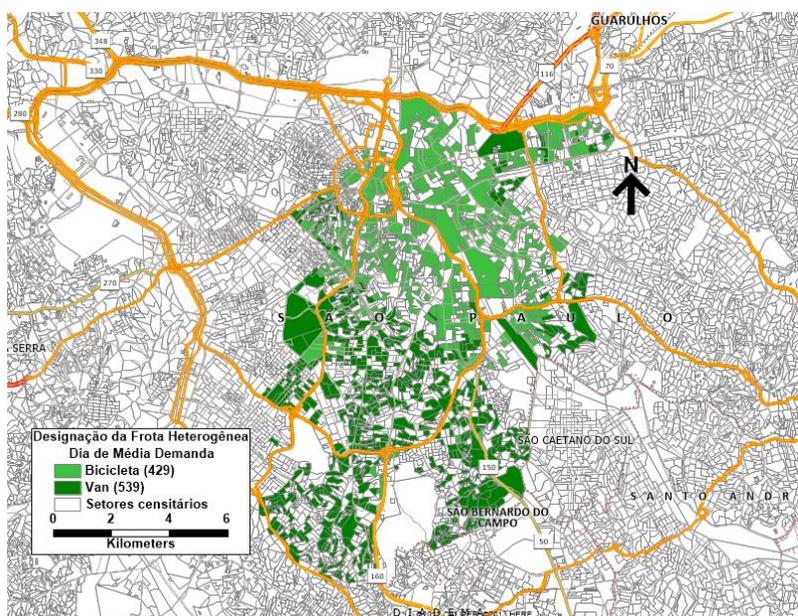


Figura 78: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos setores censitários em dia de média demanda (elaboração própria)

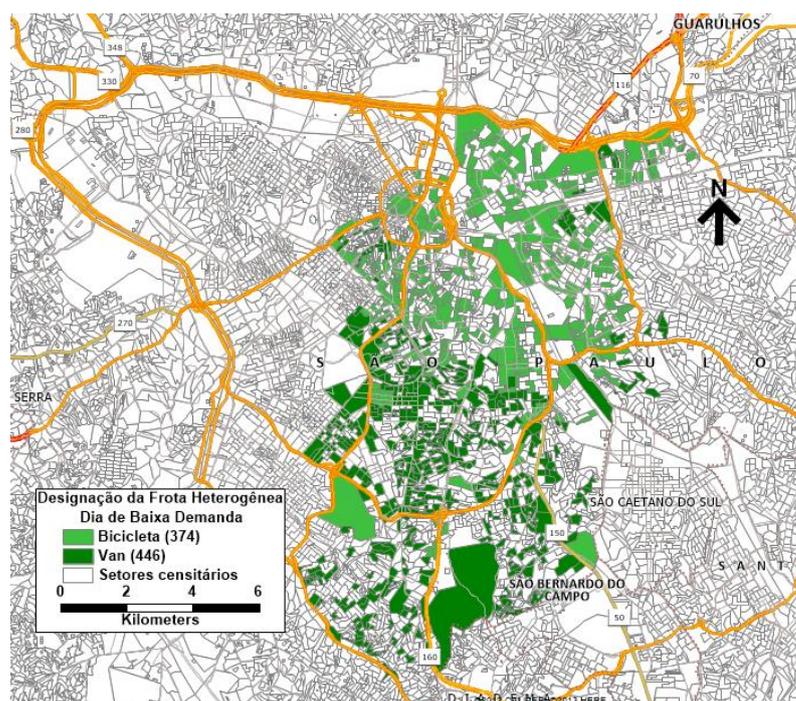


Figura 79: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos setores censitários em dia de baixa demanda (elaboração própria)

Essas análises de designação de distritos do território de entregas para frotas de vans e bicicletas no segundo estágio também são efetuadas considerando distâncias de *line-haul* diferentes das reais. O **Anexo B** traz os resultados considerando distâncias de *line-haul* nulas e equivalentes a 50% das distâncias reais. A premissa para distâncias de *line-haul* nulas leva em conta a situação de ter instalações satélite em todos os distritos. Esses resultados são gerados, com objetivo de verificar a influência da distância de *line-haul* na adoção do modo bicicleta. Através dos mapas temáticos do **Anexo B**, nota-se que a grande maioria dos distritos fica designado para atendimento por bicicleta, nos diferentes cenários de demanda. Isso significa que para distâncias curtas, isto é, para distribuição em regiões próximas de depósito, o modo bicicleta é mais recompensador em termos de custos.

Os resultados do **Anexo B** e as conclusões obtidas a partir das análises das **Figuras 62 a 79** seguem na mesma direção. A distância de *line-haul*, entre o satélite e o distrito de entrega, é o fator que mais influencia a adoção do modo bicicleta. Assim, a designação para este modo ocorre predominantemente nas regiões próximas ao satélite.

Os resultados numéricos dos cenários otimizados de distribuição com frotas heterogêneas no segundo estágio são elencados na **Tabela 3**. A designação ótima é encontrada para 18 cenários, considerando três cenários de demanda e seis tipos de divisão distrital. A tabela traz os dimensionamentos de frota para atender a região de serviço, em número de veículos do tipo van e do tipo bicicleta, os custos ótimos de distribuição no segundo estágio, em milhares de reais, e os custos unitários de distribuição no segundo estágio. O custo unitário de distribuição corresponde ao custo de distribuição por pacote, obtido pela divisão do custo de distribuição no segundo estágio pelo número de pacotes entregues.

Tabela 4 - Dimensionamento e custos de frotas heterogêneas no segundo estágio

Cenário de demanda	Tipo de divisão distrital	Número de vans	Número de bicicletas	Custo de distribuição no 2º estágio (milhares de R\$)	Custo unitário de distribuição no 2º estágio (R\$)
Alta demanda	Setores censitários	21	26	14,21	5,72
	Segmentos de 0,25km ²	28	19	14,97	5,90
	Segmentos de 1km ²	29	19	15,42	6,08
	Segmentos de 4km ²	31	18	15,90	6,27
	Segmentos de 9km ²	37	10	16,39	6,47
	Distritos administrativos	33	13	15,43	6,22
Média demanda	Setores censitários	15	20	10,49	5,84
	Segmentos de 0,25km ²	21	14	11,14	6,12
	Segmentos de 1km ²	22	13	11,58	6,35
	Segmentos de 4km ²	23	13	11,94	6,56
	Segmentos de 9km ²	27	9	12,46	6,82
	Distritos administrativos	24	10	11,63	6,48
Baixa demanda	Setores censitários	12	16	8,28	5,88
	Segmentos de 0,25km ²	17	11	8,88	6,24
	Segmentos de 1km ²	18	11	9,32	6,56
	Segmentos de 4km ²	20	8	9,65	6,79
	Segmentos de 9km ²	22	7	10,08	7,09
	Distritos administrativos	20	8	9,48	6,74

A partir da análise da **Tabela 3**, nota-se que a segmentação do território de entrega em áreas menores é mais propícia para designação para o modo bicicleta e resulta em menores custos de distribuição e dimensões de frota. Os custos de distribuição no segundo estágio

alcançam até 22% de diferença, comparando a segmentação de menores áreas e a segmentação de maiores áreas, isto é, de setores censitários e de segmentos de 9km². Por outro lado, as divisões em distritos urbanos, com aproximadamente 7km², e em segmentos de 1km², 4km² e de 0,25km² mostram até 9% de diferença em custos, ou seja, diferenças menos relevantes. Com relação ao comportamento do custo unitário, observa-se que o custo resulta maior à medida que a densidade de demanda diminui.

Outro aspecto observado é que, embora as vans tenham capacidade três vezes maior que as bicicletas, a troca de vans por bicicletas não segue essa proporção. Há outros fatores envolvidos no dimensionamento da frota que não seguem essa mesma proporção, como por exemplo, os fatores de circulação local e as velocidades. Além disso, por terem menor capacidade, as bicicletas conseguem percorrer mais roteiros em uma jornada de tempo de serviço, enquanto as vans percorrem um único roteiro. Para representar como esse efeito ocorre localmente em cada distrito logístico, a **Figura 80** ilustra um segmento de 4km² da região de entregas, que também corresponde a 4 segmentos de 1km². No caso, há 65 PODs no segmento de 4km² e, para atendê-los, seriam necessárias 2,12 bicicletas, com capacidade de 15 pacotes e percorrendo 2 roteiros, ou 1,14 vans, com capacidade de 50 pacotes e percorrendo 1 roteiro.

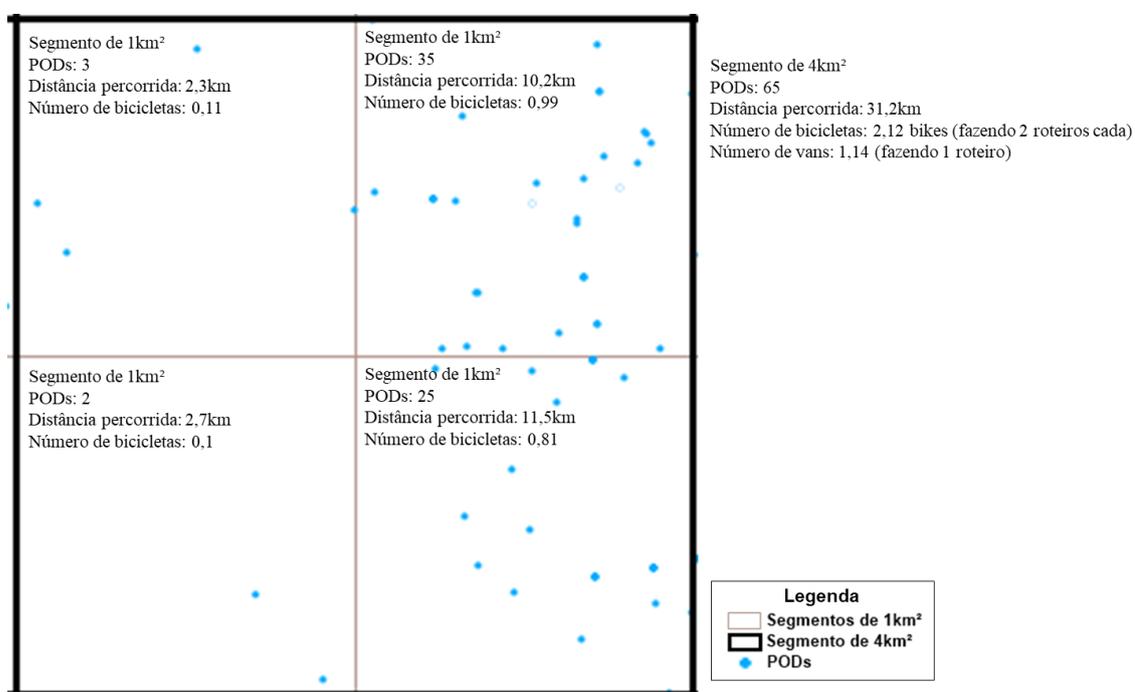


Figura 80: Exemplo de segmento da região de serviço, com dimensões de frota e distâncias obtidas para diferentes divisões distritais (elaboração própria)

Também vale observar, a partir da **Figura 80**, que as dimensões de frota resultam diferentes dependendo do tipo de divisão utilizada. Ao calcular a quantidade de bicicletas para atender os 4 segmentos de 1km² e a quantidade de bicicletas para atender o segmento de 4km², são obtidas dimensões com diferença de 5%, ou seja, 2,01 bicicletas e 2,12 bicicletas, respectivamente. Também há diferenças nas distâncias percorridas dentro da zona, que resultam em 26,7km considerando o arranjo de segmentos de 1km² e 31,2km considerando o segmento de 4km². Essas diferenças ocorrem porque o uso de áreas maiores reflete com menor intensidade as heterogeneidades de distribuição de densidades de demanda, uma vez que as formulações de aproximações de distâncias consideram distribuição uniforme.

Em última análise, depreende-se que a divisão em segmentos de 1km² se mostra mais compatível para caracterização da região de entregas aqui estudada. Além de essa divisão ser explorada na literatura, mostra-se mais satisfatória nos aspectos estudados. Do ponto de vista de distribuição de demanda, esse tipo de divisão traduz melhor as correlações espaciais e permite encontrar uma homogeneidade razoável na distribuição de densidades de PODs. Com relação a dimensionamento e custos de frota, permite encontrar custos similares aos obtidos empregando outros tipos de divisões e permite uma designação maior para o modo bicicleta, que é mais satisfatório do ponto de vista ambiental. E com relação a designação, permite maior praticidade na atribuição dos veículos, tendo em vista que o dimensionamento da frota não resulta em números muito inferiores ou superiores a 1 veículo.

Além da obtenção das designações ótimas para as frotas heterogêneas no segundo estágio, também são introduzidas restrições de disponibilidade de veículos no modelo de otimização, para análise da sensibilidade dos custos. As **Figuras 81 a 86** apresentam os resultados dessa análise de sensibilidade. É relevante compreender a influência desse fator nos custos de distribuição por algumas razões: nem sempre há total disponibilidade dos tipos de veículos no depósito satélite ou pode haver um interesse em empregar um modo mais satisfatório do ponto de vista ambiental, como as bicicletas.

Para essa análise de sensibilidade, parte-se da quantidade total de vans necessária para atender a região de entregas em cada cenário e são impostas restrições de uso desse total em faixas com variação de 10%. Isso significa que são considerados cenários de disponibilidade de 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100% da quantidade de vans necessária para atender toda a área de serviço. Para melhor compreensão dos gráficos gerados, adota-se no eixo x a variação da disponibilidade de vans.

Nesse sentido, as **Figuras 81 e 82** trazem as variações na dimensão das frotas e nos custos de distribuição, no cenário de alta demanda, com as restrições de disponibilidade de veículos. Os resultados são gerados para divisão em segmentos de 1km². Da mesma forma, as **Figuras 83 e 84** apresentam as variações na dimensão das frotas e nos custos de distribuição, no cenário de média demanda. E as **Figuras 85 e 86** exibem as variações na dimensão das frotas e nos custos de distribuição, no cenário de baixa demanda.

De modo geral, a partir da análise de sensibilidade, observa-se que as restrições de disponibilidade não trazem efeitos grandes nos custos. Nos três cenários de demanda, a disponibilidade de vans passa a influenciar o custo de distribuição a partir de faixas inferiores a 70%, isto é, abaixo da quantidade do cenário otimizado. As diferenças de custos entre cenários de designação ótima e de uso de 100% de bicicletas, ou seja, de indisponibilidade de vans, chegam a 10%.

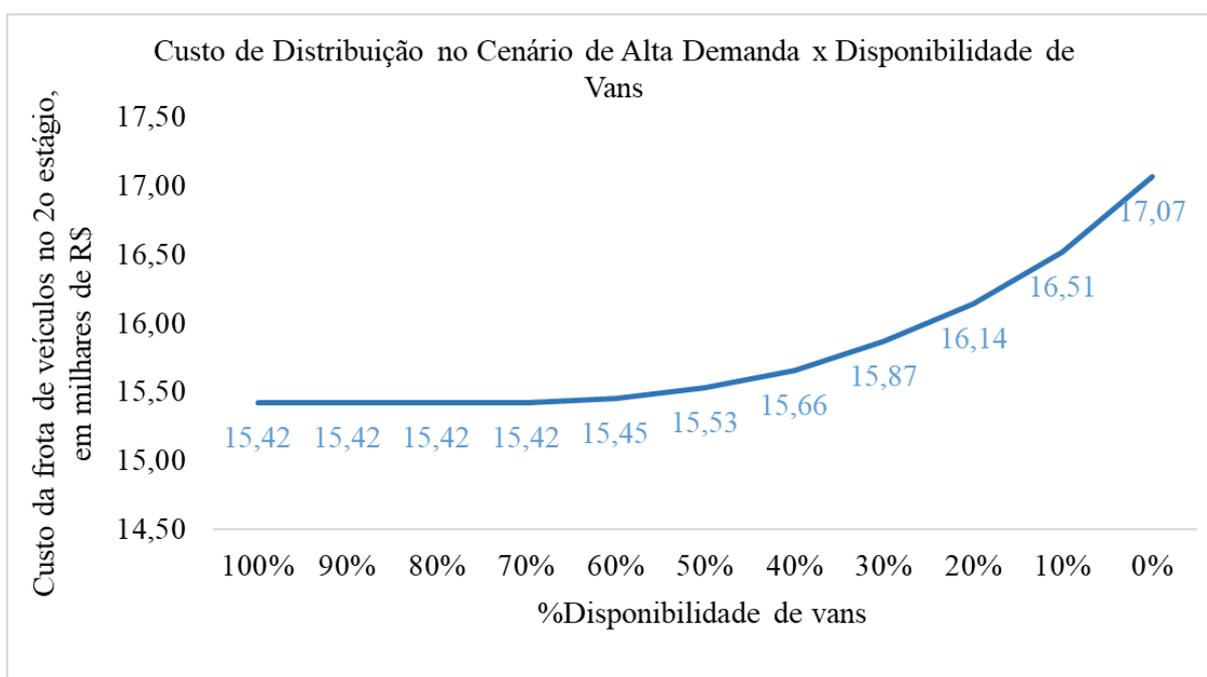


Figura 81: Gráfico do custo de distribuição para atender o segundo estágio, em cenário de alta demanda e com restrição de veículos (elaboração própria)

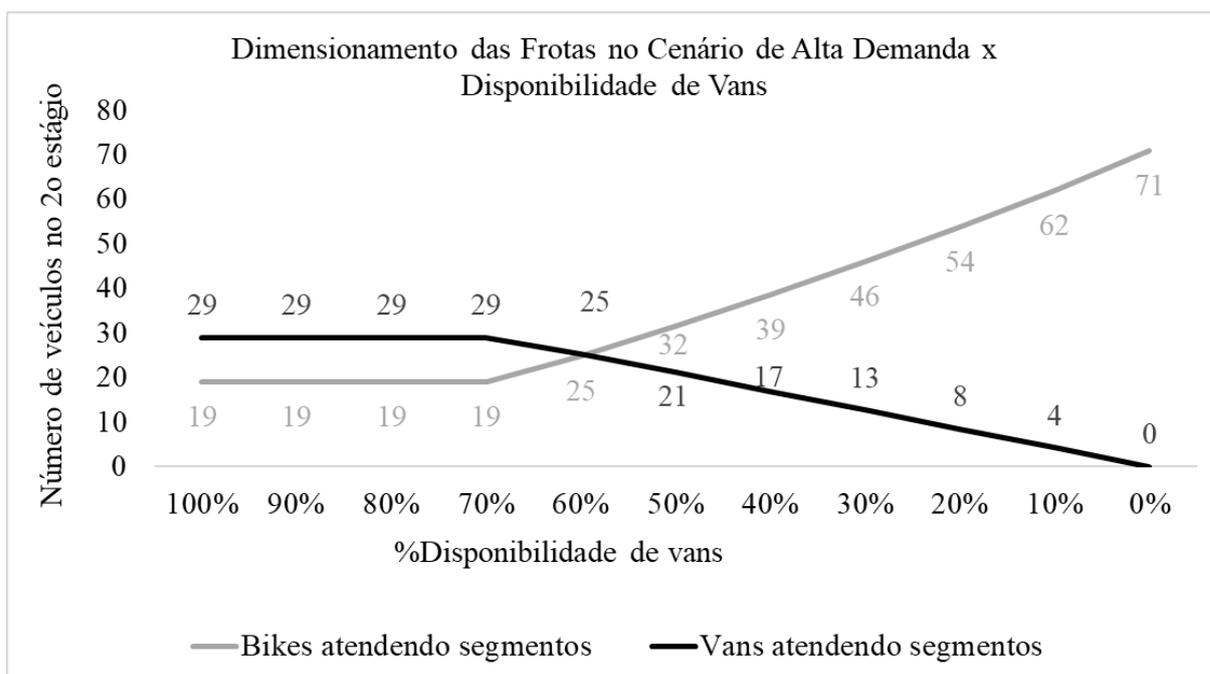


Figura 82: Gráfico do dimensionamento das frotas para atender o segundo estágio, em cenário de alta demanda e com restrição de veículos (elaboração própria)

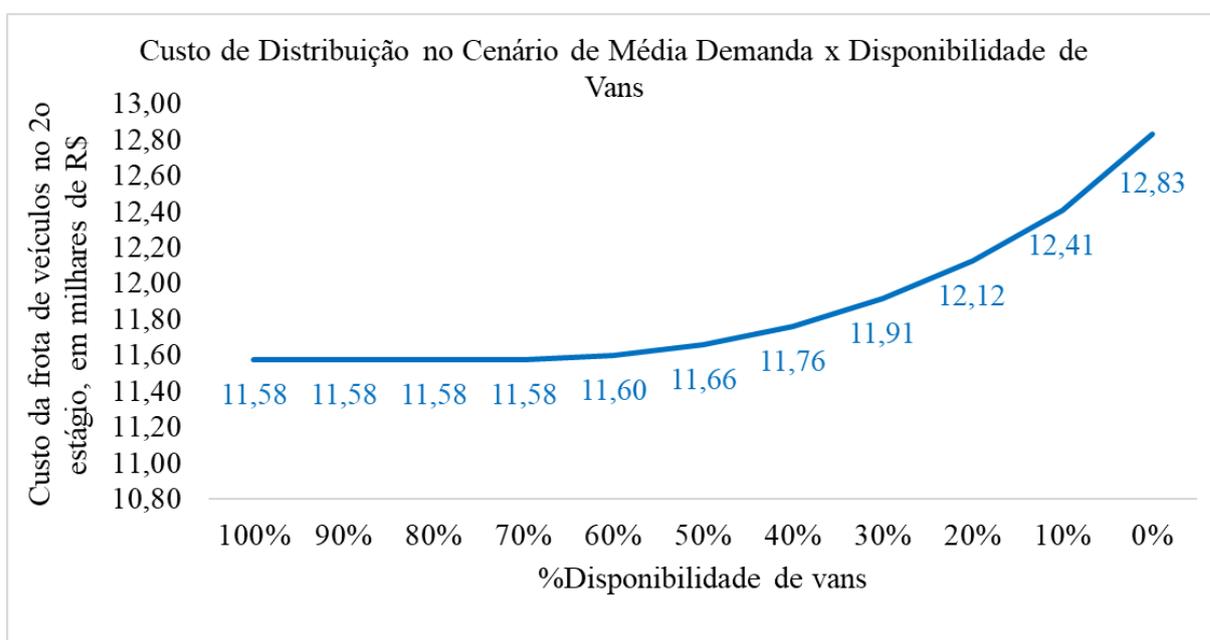


Figura 83: Gráfico do custo de distribuição para atender o segundo estágio, em cenário de média demanda e com restrição de veículos (elaboração própria)

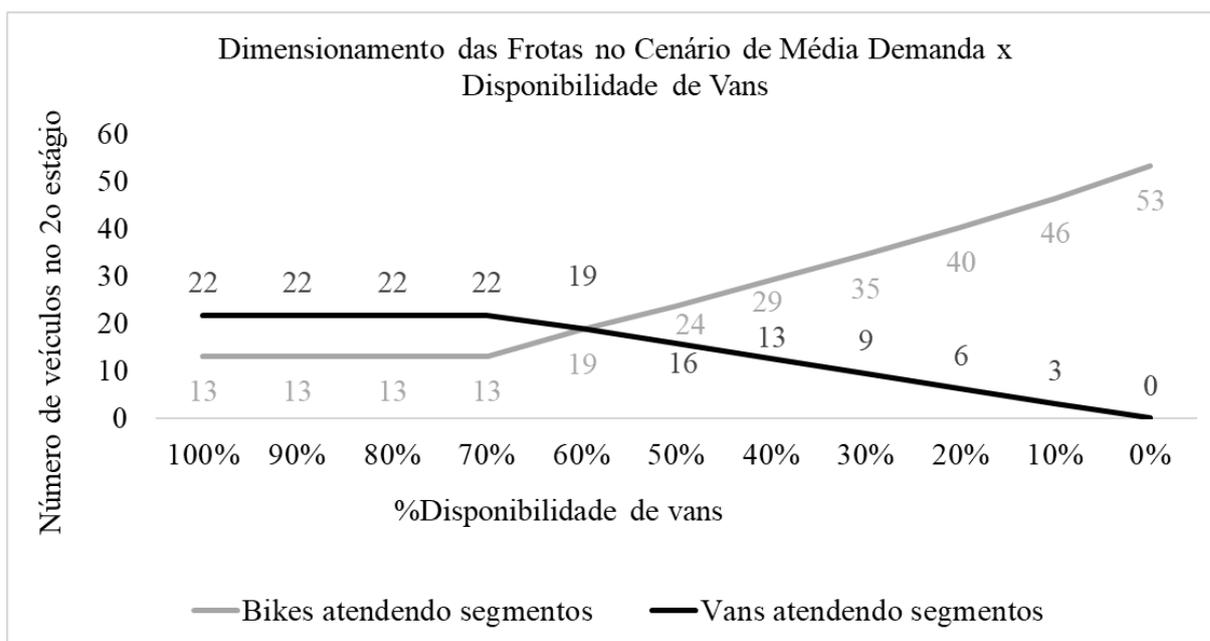


Figura 84: Gráfico do dimensionamento das frotas para atender o segundo estágio, em cenário de média demanda e com restrição de veículos (elaboração própria)

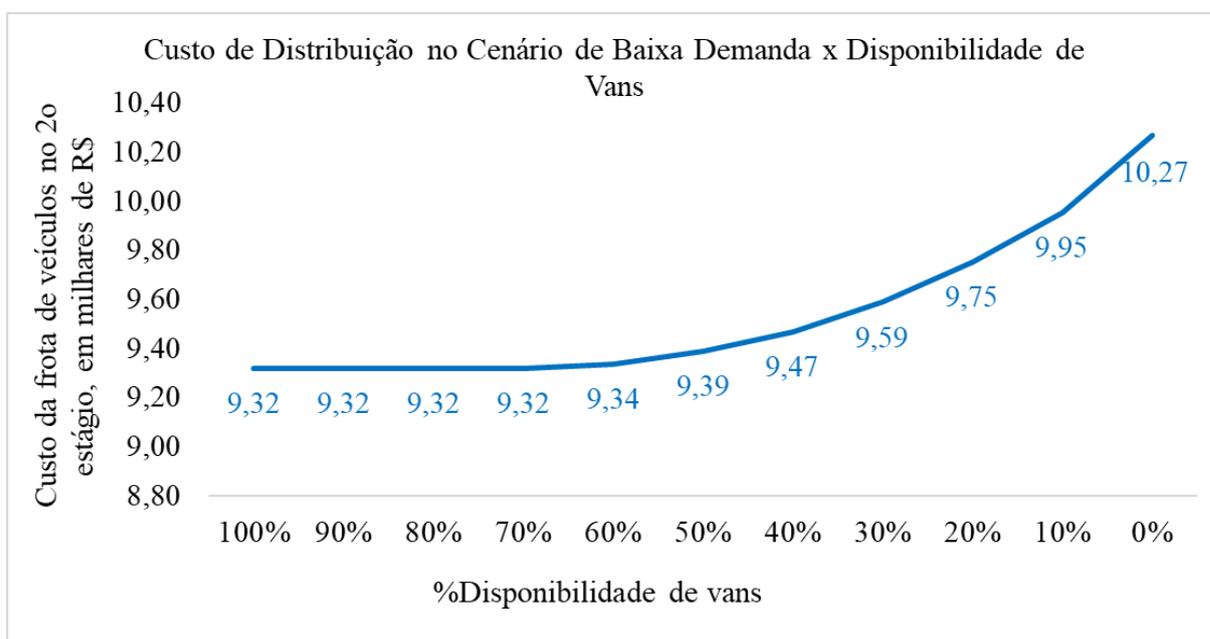


Figura 85: Gráfico do custo de distribuição para atender o segundo estágio, em cenário de baixa demanda e com restrição de veículos (elaboração própria)

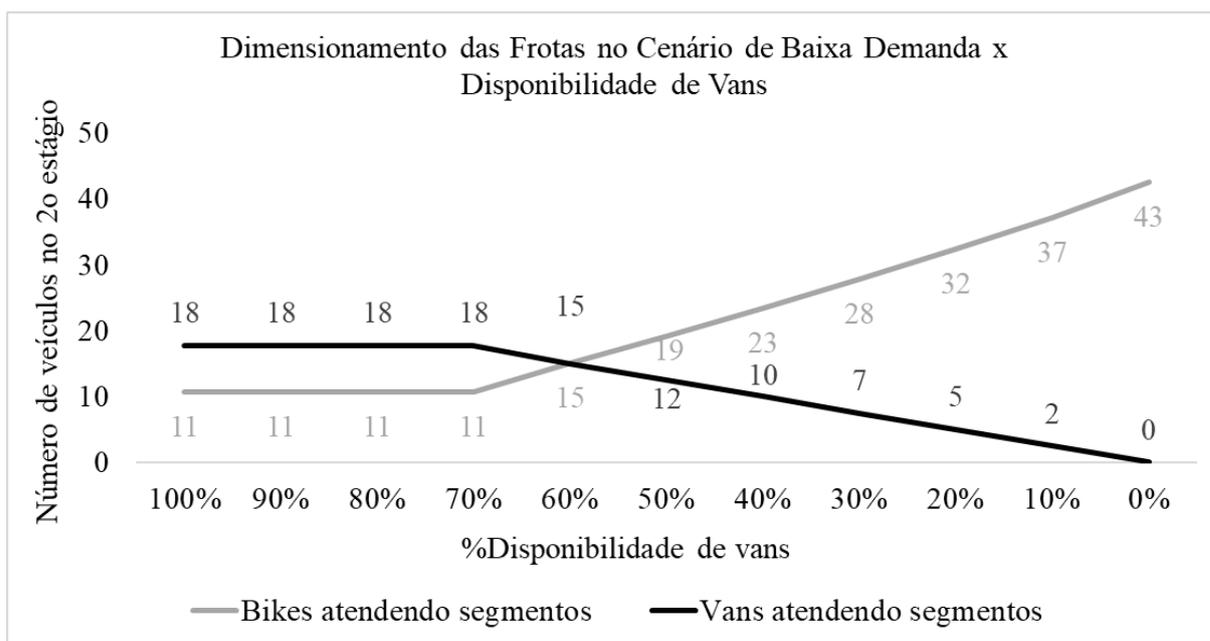


Figura 86: Gráfico do dimensionamento das frotas para atender o segundo estágio, em cenário de baixa demanda e com restrição de veículos (elaboração própria)

Por fim, a última análise conduzida busca comparar os cenários de distribuição em dois estágios, usando frotas heterogêneas, com cenários de distribuição em estágio único, usando frotas homogêneas. O cenário de distribuição em dois estágios é explorado para quatro combinações diferentes de veículos: o segundo estágio sendo atendido pelas frotas heterogêneas de vans e de bicicletas, e o primeiro estágio, entre o centro de distribuição e o satélite, sendo atendido por caminhões semi-leves ou por caminhões leves ou por caminhões médios ou por vans. Essas combinações de cenário de distribuição em dois estágios são geradas para a divisão da área de serviço em distritos administrativos e em segmentos de 1km². E para a distribuição em estágio único, isto é, com transporte dos produtos do centro de distribuição diretamente para os clientes finais, são considerados quatro tipos de frota regular homogênea – vans, caminhões semi leves, caminhões leves e caminhões médios. Essas composições de frotas são exploradas para obter os custos de distribuição em três cenários de demanda. Vale observar que, nas configurações de distribuição em dois estágios, o custo total considera as componentes de custos de distribuição no primeiro e no segundo estágio.

As **Figuras 87, 88, 89 e 90** apresentam os resultados dos custos de distribuição em estágio único e em dois estágios, respectivamente, para divisão em distritos administrativos e para divisão em segmentos de 1km². A partir dos gráficos, observa-se que os custos de distribuição

direta com frota regular de caminhões correspondem a mais que o dobro dos custos de distribuição em dois estágios. Uma razão de a distribuição em estágio único usando caminhões ser menos eficiente é que, devido a restrição de tempo máximo de serviço, esses veículos, que trafegam em baixas velocidades localmente, ficam com seu espaço interno subutilizado, isto é, não usam sua lotação máxima. Já no cenário de distribuição em dois estágios, o uso dos caminhões no primeiro estágio permite economias nos custos, pois esses veículos apresentam baixo custo quando transportam as mercadorias próximos de sua lotação máxima. Assim, na distribuição em primeiro estágio, os caminhões são mais competitivos que as vans.

Já o uso de vans no primeiro estágio não traz grandes economias em custos. Os custos de distribuição direta com frota de vans são próximos dos custos de distribuição em dois estágios, no cenário em que o primeiro estágio é atendido por vans. E os custos de distribuição direta com frota de vans são em torno de 30% maiores que os custos de distribuição em dois estágios, no cenário em que o primeiro estágio é atendido por caminhões. Isso porque as vans apresentam uma relação de custo por pacote maior, em comparação aos caminhões, e são melhor utilizadas na distribuição local, isto é, alcançam a lotação máxima na última milha.

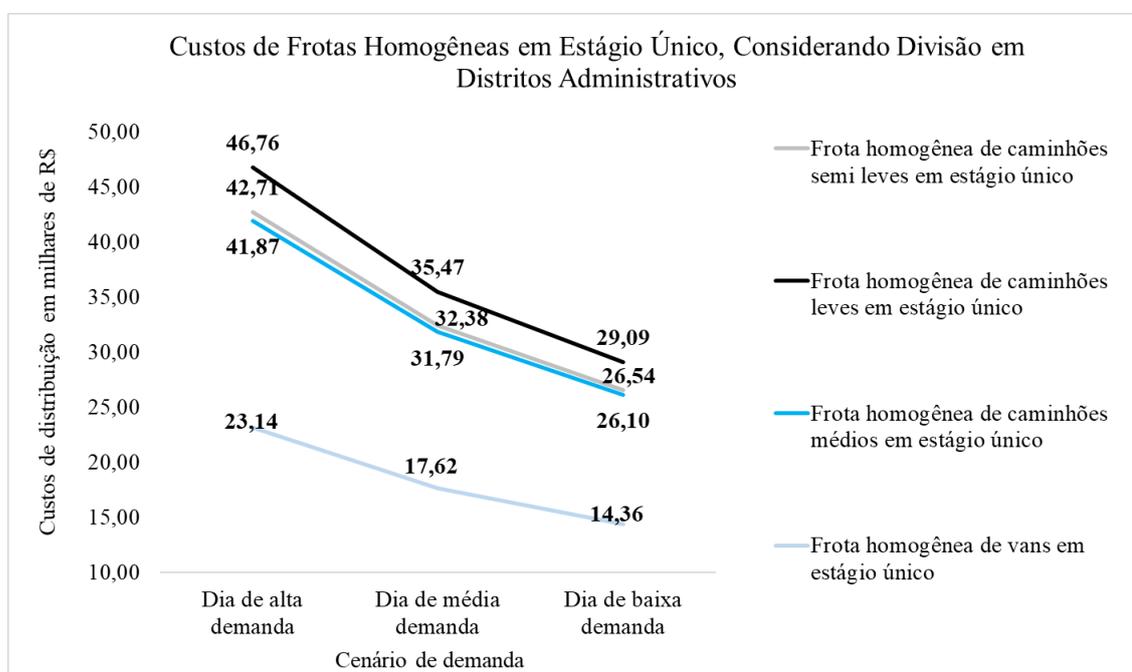


Figura 87: Gráfico dos custos de distribuição usando frotas homogêneas para transporte direto até a área de serviço, considerando distritos administrativos (elaboração própria)

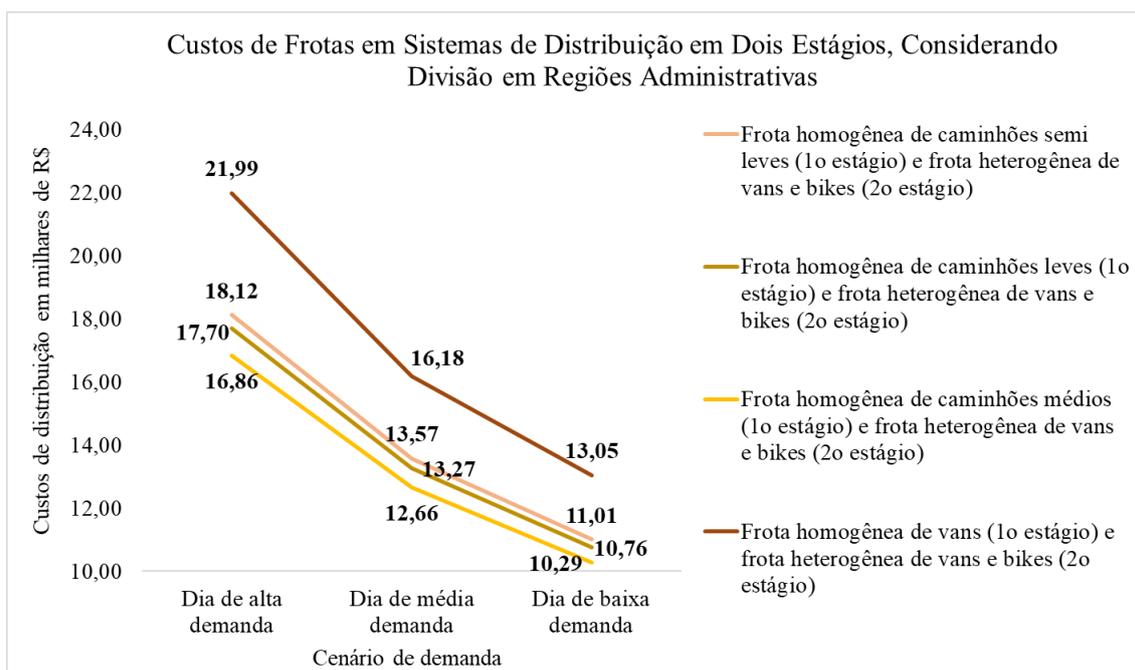


Figura 88: Gráfico dos custos de distribuição usando sistema em dois estágios, com frota homogênea no 1º estágio e frota heterogênea para transporte em 2º estágio até a área de serviço, segmentada em distritos administrativos (elaboração própria)

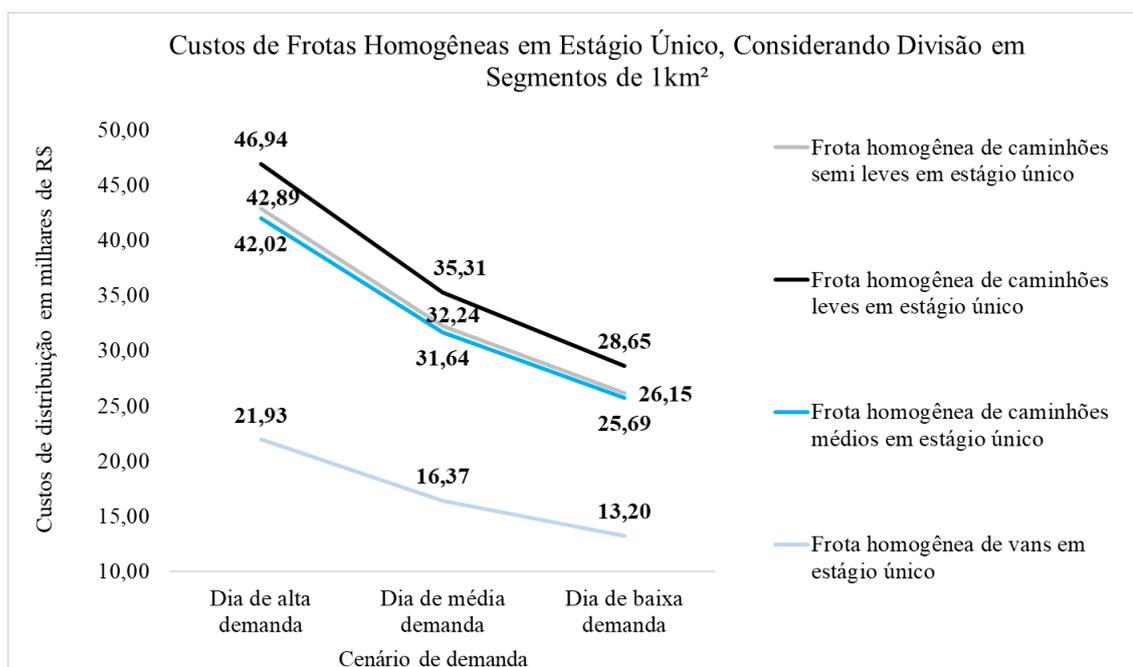


Figura 89: Gráfico dos custos de distribuição usando frotas homogêneas para transporte direto até a área de serviço, considerando segmentos de 1km² (elaboração própria)

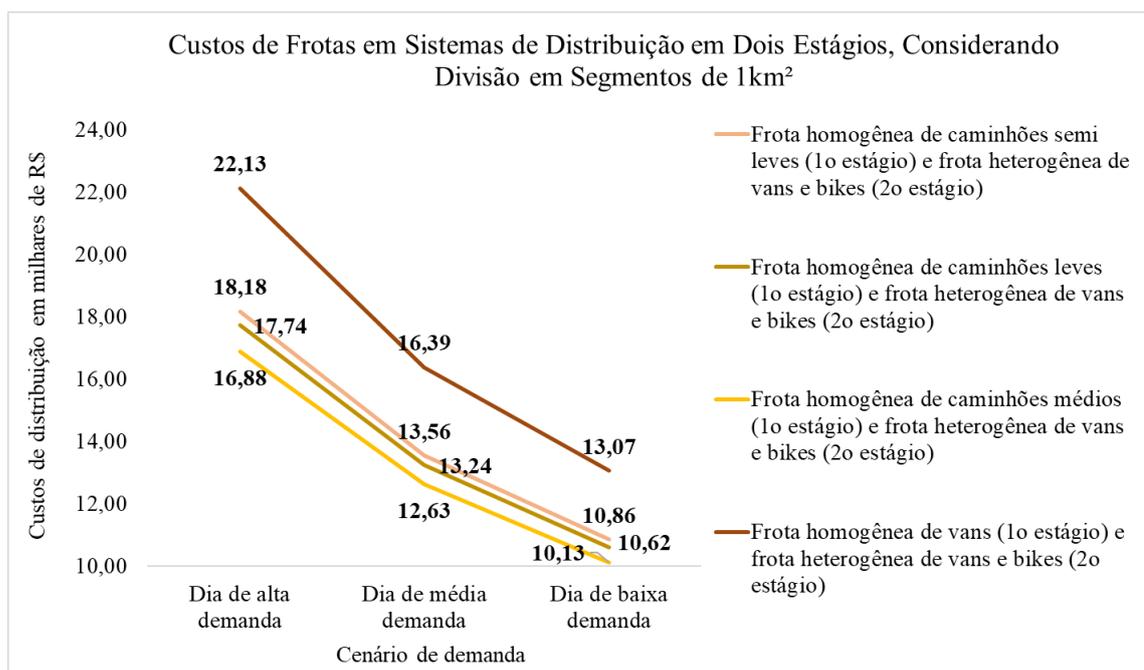


Figura 90: Gráfico dos custos de distribuição usando sistema em dois estágios, com frota homogênea no 1º estágio e frota heterogênea para transporte em 2º estágio até a área de serviço, segmentada em segmentos de 1km² (elaboração própria)

Os resultados de custos de distribuição de última milha para configurações em estágio único e em dois estágios também são representados nas **Tabelas 4 e 5**. Além dos custos totais de distribuição da última milha, são apresentados os custos unitários de distribuição por pacote. Nota-se que a configuração de distribuição que traz maior eficiência em custo é a configuração com frota homogênea de caminhões médios no primeiro estágio e frota heterogênea de vans e bicicletas no segundo estágio. Com relação aos cenários de demanda, observa-se que o custo unitário por pacote diminui à medida que a densidade de demanda aumenta, uma vez que as distâncias percorridas entre clientes são reduzidas.

Em última análise, é válido notar que essas diferenças de custos são vistas para um dia de operação de entregas. Nesse sentido, depreende-se que, no médio e longo prazo, a mudança do modelo de operação de entrega para configuração em dois estágios pode possibilitar eficiências bastante relevantes em custos de distribuição.

Tabela 5 - Custos totais e unitários de distribuição de última milha, usando diferentes configurações de distribuição para atender os distritos administrativos da região de serviço

Configurações de distribuição de última milha para atendimento de distritos administrativos	Cenário de demanda	Custo de distribuição	Custo unitário
Frota homogênea de caminhões semi leves em estágio único	Dia de alta demanda	42,71	17,21
Frota homogênea de caminhões semi leves em estágio único	Dia de média demanda	32,38	18,06
Frota homogênea de caminhões semi leves em estágio único	Dia de baixa demanda	26,54	18,88
Frota homogênea de caminhões leves em estágio único	Dia de alta demanda	46,76	18,84
Frota homogênea de caminhões leves em estágio único	Dia de média demanda	35,47	19,78
Frota homogênea de caminhões leves em estágio único	Dia de baixa demanda	29,09	20,69
Frota homogênea de caminhões médios em estágio único	Dia de alta demanda	41,87	16,87
Frota homogênea de caminhões médios em estágio único	Dia de média demanda	31,79	17,73
Frota homogênea de caminhões médios em estágio único	Dia de baixa demanda	26,10	18,56
Frota homogênea de vans em estágio único	Dia de alta demanda	23,14	9,32
Frota homogênea de vans em estágio único	Dia de média demanda	17,62	9,82
Frota homogênea de vans em estágio único	Dia de baixa demanda	14,36	10,21
Frota homogênea de caminhões semi leves (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bicicletas (2º estágio)	Dia de alta demanda	18,12	7,30
Frota homogênea de caminhões semi leves (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bicicletas (2º estágio)	Dia de média demanda	13,57	7,57
Frota homogênea de caminhões semi leves (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bicicletas (2º estágio)	Dia de baixa demanda	11,01	7,83
Frota homogênea de caminhões leves (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bicicletas (2º estágio)	Dia de alta demanda	17,70	7,13
Frota homogênea de caminhões leves (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bicicletas (2º estágio)	Dia de média demanda	13,27	7,40
Frota homogênea de caminhões leves (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bicicletas (2º estágio)	Dia de baixa demanda	10,76	7,66
Frota homogênea de caminhões médios (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bicicletas (2º estágio)	Dia de alta demanda	16,86	6,79
Frota homogênea de caminhões médios (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bicicletas (2º estágio)	Dia de média demanda	12,66	7,06
Frota homogênea de caminhões médios (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bicicletas (2º estágio)	Dia de baixa demanda	10,29	7,32
Frota homogênea de vans (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bikes (2º estágio)	Dia de alta demanda	21,99	8,86
Frota homogênea de vans (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bikes (2º estágio)	Dia de média demanda	16,18	9,03
Frota homogênea de vans (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bikes (2º estágio)	Dia de baixa demanda	13,05	9,28

Tabela 6 - Custos totais e unitários de distribuição de última milha, usando configurações diferentes de distribuição para atender os segmentos de 1km² da região de serviço

Configurações de distribuição de última milha para atendimento de segmentos de 1km ²	Cenário de demanda	Custo de distribuição	Custo unitário
Frota homogênea de caminhões semi leves em estágio único	Dia de alta demanda	42,89	16,91
Frota homogênea de caminhões semi leves em estágio único	Dia de média demanda	32,24	17,70
Frota homogênea de caminhões semi leves em estágio único	Dia de baixa demanda	26,15	18,42
Frota homogênea de caminhões leves em estágio único	Dia de alta demanda	46,94	18,51
Frota homogênea de caminhões leves em estágio único	Dia de média demanda	35,31	19,38
Frota homogênea de caminhões leves em estágio único	Dia de baixa demanda	28,65	20,18
Frota homogênea de caminhões médios em estágio único	Dia de alta demanda	42,02	16,57
Frota homogênea de caminhões médios em estágio único	Dia de média demanda	31,64	17,36
Frota homogênea de caminhões médios em estágio único	Dia de baixa demanda	25,69	18,09
Frota homogênea de vans em estágio único	Dia de alta demanda	21,93	8,65
Frota homogênea de vans em estágio único	Dia de média demanda	16,37	8,99
Frota homogênea de vans em estágio único	Dia de baixa demanda	13,20	9,30
Frota homogênea de caminhões semi leves (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bicicletas (2º estágio)	Dia de alta demanda	18,18	7,17
Frota homogênea de caminhões semi leves (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bicicletas (2º estágio)	Dia de média demanda	13,56	7,44
Frota homogênea de caminhões semi leves (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bicicletas (2º estágio)	Dia de baixa demanda	10,86	7,65
Frota homogênea de caminhões leves (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bicicletas (2º estágio)	Dia de alta demanda	17,74	7,00
Frota homogênea de caminhões leves (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bicicletas (2º estágio)	Dia de média demanda	13,24	7,27
Frota homogênea de caminhões leves (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bicicletas (2º estágio)	Dia de baixa demanda	10,62	7,48
Frota homogênea de caminhões médios (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bicicletas (2º estágio)	Dia de alta demanda	16,88	6,66
Frota homogênea de caminhões médios (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bicicletas (2º estágio)	Dia de média demanda	12,63	6,93
Frota homogênea de caminhões médios (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bicicletas (2º estágio)	Dia de baixa demanda	10,13	7,14
Frota homogênea de vans (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bikes (2º estágio)	Dia de alta demanda	22,13	8,73
Frota homogênea de vans (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bikes (2º estágio)	Dia de média demanda	16,39	9,00
Frota homogênea de vans (1º estágio) e frota heterogênea de vans e bikes (2º estágio)	Dia de baixa demanda	13,07	9,20

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo explorar um problema de distribuição de comércio eletrônico em megacidade, com foco na definição do dimensionamento e da composição de frota. Primeiramente, foi realizada uma revisão da literatura para enunciar os conceitos acerca de sistemas de distribuição em dois estágios e de aproximações de distâncias, e para investigar a literatura existente sobre o uso desses tipos de abordagens em problemas de dimensionamento de frota. Muitos dos estudos encontrados incorporam decisões de frota em problemas de roteirização e de localização de instalações, com métodos de otimização exata e heurística. Alguns trabalhos contribuem para abordagem da gestão de frotas de forma tática, com a introdução de modelos teóricos baseados em aproximação contínua (Jabali *et al.*, 2012; Nourinejad e Roorda, 2017; Franceschetti, 2017). Ainda assim, há poucos estudos que apliquem este tipo de abordagem em problemas de distribuição urbana de grande escala, como Winkenbach *et al.* (2016) e Pina-Pardo *et al.* (2022). A nível de cidade, as abordagens de aproximação podem ser úteis para obter visão de custos envolvidos, comparar alternativas e, portanto, compor cenários para tomada de decisões.

Na sequência, foi proposto um método para analisar o dimensionamento de frota e compensações de custos de distribuição, em sistemas de distribuição em dois estágios. Para isso, foi desenvolvido um estudo de caso usando dados reais de entrega de um grande varejista brasileiro, que atende a região de São Paulo (SP, Brasil). O método se iniciou com a avaliação de características da região de entregas, como da distribuição de demanda e da rede viária para distintos modos de transporte. Para estudo da rede, foram determinados fatores de circulação local de automóveis e de bicicletas, com o uso da base Open Street Maps. E para estudo da demanda, foram utilizadas técnicas de análise espacial, que permitiram investigar se havia formação de regiões homogêneas em densidade de demanda.

Posteriormente, o método trouxe a caracterização do problema de distribuição. De modo geral, o território de entrega abrange uma área de aproximadamente 150km² da cidade de São Paulo e contém um único satélite, que recebe as mercadorias de um centro de distribuição localizado fora da cidade. No cenário de distribuição em estágio único, a área de serviço é atendida por uma frota homogênea de veículos, que transporta os produtos diretamente, partindo do centro de distribuição. E no cenário de distribuição em dois estágios, uma frota homogênea de veículos de grande porte transporta os produtos do centro de distribuição até o

satélite, localizado no território de entrega, e uma frota heterogênea de veículos de menor porte, composta por vans e bicicletas, transporta os produtos do satélite até os clientes.

A partir disso, o método trouxe os subsídios necessários para conduzir as análises exploratórias de custos de distribuição e de dimensões de frotas. A definição de distritos logísticos dentro da região de entregas foi realizada considerando diferentes tipos de divisões distritais, como grade de segmentos regulares e divisões administrativas. Através de abordagem de aproximação contínua, pôde-se encontrar o custo de distribuição e a dimensão da frota necessária para atender cada distrito logístico, usando cada tipo de veículo. E complementando com um modelo de programação linear inteira, pôde-se obter a designação otimizada dos tipos de veículos para os distritos. Por fim, os custos de distribuição foram comparados para os dois tipos de sistemas logísticos – distribuição em estágio único e em dois estágios.

Os resultados do estudo de caso permitiram responder às perguntas de pesquisa. A partir do estudo da rede viária, foram visualizados comportamentos semelhantes para os fatores de circulação local de bicicletas e de automóveis. Isso significa que não foram visualizadas diferenças relevantes, em termos de distâncias percorridas, entre usar uma bicicleta e usar um automóvel na distribuição. Assim, para os dois modos de transporte, o trajeto em rede se mostrou, em geral, duas vezes maior do que seria um trajeto em linha reta.

Com relação à distribuição espacial das densidades de demanda na região de entregas, foram possíveis algumas constatações. As análises espaciais foram exploradas para seis tipos de divisões do território, considerando três cenários de demanda. Embora os resultados de algumas divisões tenham mostrado correlações espaciais de vizinhança mais significativas, como por exemplo da divisão em distritos urbanos e em segmentos de 1km² e de 0,25km², os agrupamentos de áreas mostraram descontinuidades. Também não foram identificadas zonas de bordas que permitissem delinear agrupamentos contínuos de demanda. Portanto, não foram encontradas relações de vizinhança tão satisfatórias para definir distritos logísticos homogêneos em demanda.

Tendo em vista que não puderam ser gerados distritos homogêneos, as divisões em regiões administrativas e em segmentos de tamanho regular foram utilizadas para avaliar os reflexos de empregar divisões distritais distintas na área de atendimento do satélite, para o dimensionamento da frota e para os custos de distribuição. Com isso, observou-se que o emprego de diferentes divisões produziu diferenças razoáveis nas dimensões das frotas e nos

custos de distribuição, chegando por exemplo a 22% de diferença em custos. Também foi possível notar que a divisão em segmentos de 1km², mostrou-se mais compatível para caracterização da região de entregas. Isso porque permitiu maior designação para modo bicicleta e porque permitiu maior praticidade na atribuição dos veículos.

E por fim, foi possível comparar os custos de distribuição de cenários de distribuição em dois estágios e da distribuição direta. De modo geral, notou-se que o cenário de distribuição em dois estágios, com uso de caminhões no primeiro estágio e frota heterogênea de vans e bicicletas no segundo estágio, mostrou-se muito mais eficiente em custos, comparativamente ao cenário de distribuição direta. Isso porque os caminhões apresentam baixo custo quando transportam as mercadorias próximos de sua lotação máxima, isto é, no trajeto de primeiro estágio.

Em última análise, este trabalho buscou contribuir com análises e reflexões para a temática da distribuição urbana na última milha. A adoção de modelos operação de entregas com configuração em dois estágios tem potencial para trazer economias relevantes em custos de distribuição. Do ponto de vista ambiental, o uso de modos alternativos, como de bicicletas cargueiras, traz uma série de benefícios, como por exemplo, redução de emissões de gases poluentes e redução de congestionamentos em megacidades.

Nesse contexto de distribuição urbana, a gestão de frotas é uma questão relevante. Com o crescimento do comércio eletrônico, resolver problemas de distribuição em larga escala é um desafio permanente. Nesse sentido, o uso de abordagens que permitam simplificações e obtenção de visões de custos pode ser bastante pertinente para tomada de decisões.

Como direções de pesquisas futuras, é possível explorar novas características de problemas de distribuição urbana e a aplicação de métodos diferentes para determinação dos custos de distribuição e dimensionamento da frota. Com relação a novas características de problemas, há oportunidade de estudar a distribuição em cidades de médio porte, a distribuição com coleta e entrega, considerando fluxos reversos, e a distribuição com carga fracionada. Também há oportunidade de explorar problemas envolvendo novos tipos de veículos, como drones e veículos elétricos, considerando restrições na otimização de designação de veículos. Com relação ao método, há oportunidade de explorar outras formulações de aproximação de distâncias, além da formulação de aproximação de distâncias euclidianas corrigidas por fatores de circuito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, L. L., Saraiva, F. A., Silva, J. V. S., Cruz, J. P. G., Yamaguti, P. L. S., Ferreira Junior, S. N., Mendes, A. A., Yoshizaki, H. Y. T. e Brito Júnior, I. (2022) Logística e Cadeias de Suprimentos no Comércio Eletrônico: Análise Bibliométrica da Literatura. Em: Anais do 36º Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2022, Fortaleza. Disponível em: <https://proceedings.science/anpet-2022/trabalhos/logistica-e-cadeias-de-suprimentos-no-comercio-eletronico-analise-bibliometrica?lang=pt-br>. Acessado em: 15 agosto de 2023.
- Akbay, M. A., Kalayci, C. B., Blum, C., Polat, O. (2022) Variable Neighborhood Search for the Two-Echelon Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Applied Sciences*, v. 12, n. 3, p. 1014.
- Amaral, J.C. (2018) Análise da Complexidade da Malha Viária para Distribuição de Última Milha em Áreas Urbanas. São Paulo. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Amaral, J.C. e Cunha, C. B (2020). An exploratory evaluation of urban street networks for last mile distribution. *Cities*, v. 107, artigo 102916. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102916>
- Ansari, S., Basdere, M., Li, X., Ouyang, Y. e Smilowitz, K. (2018) Advancements in continuous approximation models for logistics and transportation systems: 1996–2016. *Transportation Research Part B*, v. 107, p. 229-252. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.09.019>
- Anselin, L. (1995) Local Indicators of Spatial Association – LISA, *Geographical Analysis*, 27, 93-115.
- Anselin, L. (2005) *Exploring Spatial Data with GeoDa: A Workbook*. Center for Spatially Integrated Social Science.
- Arenales, M., Armentano, V., Morabito, R. e Yanasse, H. (2011) *Pesquisa Operacional*. Ed. Elsevier, Rio de Janeiro.
- Arnold, F., Cardenas, I., Sorensen, K., Dewulf, W. (2018) Simulation of B2C e-commerce distribution in Antwerp using cargo bikes and delivery points. *European Transport Research Review*, v. 10, ed. 1, p. 1-13.
- Assmann, T., Lang, S., Muller, F., Schenk, M. (2020) Impact Assessment Model for the Implementation of Cargo Bike Transshipment Points in Urban Districts. *Sustainability*, v. 12, n. 10, p. 4082.
- Bailey, T. e Gattrel, A. C. (1995) *Interactive Spatial Data Analysis*, London, Longman.
- Baldacci, R.; Mingozzi, A., Roberti, R. e Wolfler Calvo, R. (2013) An exact algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Oper Res*, v. 61, n. 2, p. 298-314. <http://dx.doi.org/10.1287/opre.1120.1153>
- Ballou, R. H., Rahardja, H. e Sakai, N. (2002) Selected country circuitry factors for road travel distance estimation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. v. 36, n. 9, p. 843–8
- Ballou, R. H. (2004) *Business logistics/supply chain management. Planning, organizing and controlling the supply chain*. Ed. Pearson/Prentice Hall Inc, Nova Jersey.
- Banerjee, D., Erera, A. L. e Toriello, A. (2022) Fleet Sizing and Service Region Partitioning for Same-Day Delivery Systems. *Transportation Science*, v. 56, n. 5, p. 1111-1408.
- Beardwood, J., Halton, J. H. e Hammersley, J. M. (1959) The shortest path through many points, *Math. Proc. Camb. Philos. Soc.* v. 55, n. 4, p. 299–327. <https://doi.org/10.1017/S0305004100034095>
- BikeMoto. Disponível em: <https://www.bikemoto.net/copia-de-/prod-7223213/>. Acessado em: 11 de junho de 2023.

- Bike Registrada (2022) Quando fazer revisão de bike? Disponível em: <https://blog.bikeregistrada.com.br/revisao-de-bike/>. Acessado em: 11 de junho de 2023.
- Boeing, G. (2017) OSMnx: New Methods for Acquiring, Constructing, Analyzing, and Visualizing Complex Street Networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 65, p. 126-139. doi:10.1016/j.compenurbsys.2017.05.004
- Breunig, U., Baldacci, R., Hartl, R. F. e Vidal, T. (2019) The electric two-echelon vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, v. 103, p. 198-210.
- Buttgen, A., Turan, B., Hemmelmayr, V. (2021) Evaluating Distribution Costs and CO₂- Emissions of a Two-Stage Distribution System with Cargo Bikes: A Case Study in the City of Innsbruck. *Sustainability*, v. 13, n. 24, p. 13974.
- Câmara, G., Carvalho, M. S., Cruz, O. G. e Correa, V. (2004) Análise Espacial de Áreas. In: Druck, S., Carvalho, M. S., Câmara, G. e Monteiro, A. M. V. *Análise Espacial de Dados Geográficos*. Ed. EMBRAPA, Brasília, cap. 5. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/cap5-areas.pdf>. Acessado em: 23 de janeiro de 2023.
- Crainic, T.G, Ricciardi, N. e Storchi, G. (2009) Models for evaluating and planning city logistics systems. *Transp Sci*, v. 43, p. 432-454. <https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0279>
- CarlaCargo. Disponível em: <https://carlacargo.de/>. Acessado em: 11 de junho de 2023.
- CISLog. Disponível em: <http://usp.br/cislog/>. Acessado em: 11 de junho de 2023.
- Conselho Federal de Contabilidade (2023). Taxa SELIC 2022/2023. Disponível em: <https://cfc.org.br/desenvolvimento-operacional/taxa-selic/>. Acessado em: 11 de junho de 2023.
- Cuda, R.; Guastaroba, G. e Speranza, M. G. (2015) A survey on two-echelon routing problems. *Computers & Operations Research*, v. 55, p. 185-199. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2014.06.008>
- Cunha, C. B. e Yoshizaki, H. T. Y. (2018) Operational Impacts of Uncertainty on Delivery Times for Off-Hours Deliveries in the City of Sao Paulo, Brazil. *Proceedings of TRB, 97th Annual Meeting of the Transportation Research Board*.
- Dablanc, L. (2007) Goods transport in large European cities: Difficult to organize, difficult to modernize. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 41, n. 3, p. 280–285. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2006.05.005>
- Daganzo, C.F. (1984) The distance traveled to visit N points with a maximum of C stops per vehicle: An analytic model and an application. *Transp. Sci.* v. 18, p. 331–350
- Dalfard, V. M., Kaveh, M. e Nosratiyan, N. E. (2013) Two meta-heuristic algorithms for two-echelon location-routing problem with vehicle fleet capacity and maximum route length constraints. *Neural Computing and Applications*, v. 23, p. 2341–2349
- Dijkstra, E. W. (1959) A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik*, v. 1, n. 1, p. 269-271.
- E-commerce Brasil (2021a) Com crescimento de 75%, e-commerce brasileiro representou 11% das vendas do varejo em 2020. Disponível em: <https://www.ecommercebrasil.com.br/noticias/e-commerce-brasileiro-vendas-varejo-2020>. Acessado em: 11 de junho de 2023
- E-commerce Brasil (2021b) Como o cálculo de cubagem afeta os custos de frete do seu e-commerce. Disponível em: <https://www.ecommercebrasil.com.br/artigos/como-o-calculo-de-cubagem-afeta-os-custos-de-frete-do-seu-e->

commerce#:~:text=O%20que%20%C3%A9%20cubagem%20no,um%20espa%C3%A7o%20diferente%20no%20bagageiro. Acessado em: 11 de junho de 2023

- Franceschetti, A., Honhon, D., Laporte, G., Woensel, T. V. e Fransoo, J. C. (2017) Strategic Fleet Planning for City Logistics. *Transportation Research Part B*, v. 95, p. 19-40.
- Ferraz, A. C. P. e Torres, I. G. E. (2004) Transporte público urbano, Ed. RiMa, São Carlos, 2ª ed., p. 309-315.
- Galvão, L. C., Novaes, A.G., Souza de Cursi, J.E. e Souza, J. C (2006) A multiplicatively-weighted Voronoi diagram approach to logistics districting. *Computers and Operations Research*, v. 33, p. 93-114. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.07.001>
- Gao, Y., Leng, M., Zhang, Y. e Liang, L. (2022) Incentivizing the adoption of electric vehicles in city logistics: Pricing, driving range, and usage decisions under time window policies. *International Journal of Production Economics*, v. 245, p. 108406.
- Giacomin, D. J. e Levinson, D. M. (2015) Road network circuitry in metropolitan areas. *Environment and Planning B: Planning and Design*, v. 42, n. 6, p. 1040-53
- Gillies, S. and others (2007) Shapely: manipulation and analysis of geometric objects. Disponível em: <https://github.com/Toblerity/Shapely>. Acessado em: 08 de fevereiro de 2023.
- Golden, B. L., Assad, A. A., Levy, L., Gheysens, F. (1984) The Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem. *Comput. Oper. Res.*, v. 11, n.1, p. 49-66.
- Google Maps. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps>. Acessado em: 05 de dezembro de 2022.
- Guia do TRC (2023). Disponível em: <http://www.guiadotrc.com.br/>. Acessado em: 11 de junho de 2023.
- Gurobi Optimization (2023). Gurobi Optimizer Reference Manual. Ed. LLC, v. 10.0. Disponível em: https://www.gurobi.com/wp-content/plugins/hd_documentations/documentation/10.0/refman.pdf. Acessado em: 27 de fevereiro de 2023.
- Hagberg, A. A., Schult, D. A. e Swart, P. J. (2008) Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX. In *Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy2008)*. Eds. Varoquaux, G., Vaught, T. e Millman, J., Pasadena (EUA), p. 11-15.
- Hemmelmayr, V.C., Cordeau, J.F. e Crainic, T.G. (2012) An adaptive large neighborhood search heuristic for two-echelon vehicle routing problems arising in city logistics. *Comput Oper Res*, v. 39, p. 3215-3228. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.04.007>
- Huang, Y., Savelsbergh, M. e Zhao, L. (2018) Designing logistics systems for home delivery in densely populated urban areas. *Transportation Research Part B*, v. 115, p. 95-125. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.07.006>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE pop e domicilios Censo 2010. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default_resultados_universo.shtm. Acessado em 10 de junho de 2023.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE pop e domicilios Censo 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acessado em 10 de junho de 2023.
- Jabali, O.; Gendreau, M. e Laporte, G. (2012) A Continuous Approximation Model for the Fleet Composition Problem. *Transportation Research Part B*, v. 46, n. 10, p. 1591-1606.
- Jabali, O. e Erdogan, G (2015) Continuous Approximation Models for the Fleet Replacement and Composition Problem. Technical report, CIRRELT, p. 2015-64.

- Janjevic, M., Winkenbach, M. e Merchán, D (2019) Integrating collection-and-delivery points in the strategic design of urban last-mile e-commerce distribution network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 131, p. 37-67. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.09.001>
- Jordahl, K., den Bossche, J. V., Fleischmann, M., Wasserman, J., McBride, J., Gerard, J., ... Leblanc, F. (2020) *geopandas/geopandas: v0.8.1 (Version v0.8.1)*. Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.3946761>
- Kalcsics, J (2015). Districting problems. In: Laporte, G., Nickel, S. e Gama, F. S. d. *Location Science* (ed.). Ed. Springer, 127 ed, p. 595-622. 10.1007/978-3-319-13111-5_23
- Koç, C., Bektaş, T., Jabali, O., Laporte, G. (2016) The impact of depot location, fleet composition and routing on emissions in city logistics. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 84, p. 81-102.
- Lima Júnior, O. F. (2001) Análise e Avaliação do Desempenho dos Serviços de Transporte de Carga. In: Caixeta-Filho, J. V. e Martins, R. S. *Gestão Logística do Transporte de Cargas*. Ed. Atlas, São Paulo, cap. 5, p. 108-145.
- Lindner, J. (2011) *Last Mile Logistics Capability: a Multidimensional System Requirements Analysis for a General Modelling and Evaluation Approach*. Dipl. Technical University of Munich.
- Liu, D., Deng, Z. H., Zhang, W. B., Wang, Y. H., Kaiser, E. I. (2021) Design of sustainable urban electronic grocery distribution network. *Alexandria Engineering Journal*, v. 60, n. 1, p. 145-157.
- Longley, P. B. M. (1996) *Spatial Analysis: Modelling in a GIS Environment*. John Wiley & Sons, New York.
- Love, R. F. e Morris, J. G. (1972) Modelling Inter-City Road Distances by Mathematical Functions. *Operational Research Quarterly*. v. 23, n. 1, p. 61–71. <https://doi.org/10.1057/jors.1972.6>
- Love, R. F. e Morris, J. G. (1979) Mathematical Models of Road Travel Distances. *Management Science*, v. 25, n. 2, p. 130–9
- Merchán, D. e Winkenbach, M (2019a) An empirical validation and data-driven extension of continuum approximation approaches for urban route distances. *Networks*, v. 73, p. 418–433. 10.1002/net.21874
- Merchán, D., Snoeck, A. e Winkenbach, M. (2019b) Title: Quantifying the impact of urban road networks on the efficiency of local trips. MIT Global Scale Network, Working Paper Series 19-01
- Miotto, R. (2021) Bicicleta elétrica: compra, assinatura ou compartilhada? Veja pontos positivos e negativos. Disponível em: <https://g1.globo.com/mobilidade/noticia/2021/12/12/bicicleta-eletrica-compra-assinatura-ou-compartilhada-veja-pontos-positivos-e-negativos.ghtml>. Acessado em: 11 de junho de 2023.
- Newell, G.F e Daganzo, C.F. (1986a). Design of multiple vehicle delivery tours – II: Other metrics. *Transp. Res. B*, v. 20, p. 365–376
- Newell, G.F. e Daganzo, C.F. (1986b), Design of multiple-vehicle delivery tours – I: A ring-radial network. *Transp. Res. B*, v. 20, p. 345–363
- Nourinejad, M. e Roorda, M. J. (2017) A Continuous Approximation Model for the Fleet Composition Problem on the Rectangular Grid. *OR Spectrum*, v. 39, p. 373–401.
- Novaes, A.G., Souza de Cursi, J.E. e Graciolli, O.D. (2000) A continuous approach to the design of physical distribution systems. *Computers and Operations Research*, v. 27, p. 877-893
- Novaes, A. G. (2001) *Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição. Estratégia, Operação e Avaliação*. Ed. Campus, Rio de Janeiro.

- Nuflow (2021) Quanto vale minha bike? Guia para precificar bicicletas usadas. Disponível em: <https://nuflowshop.com.br/quanto-vale-minha-bike-guia-para-precificar-bicicletas-usadas/>. Acessado em: 11 de junho de 2023.
- Oliveira, C. M., Albergaria De Mello Bandeira, R., Vasconcelos Goes, G., Schmitz Gonçalves, D. N., D'Agosto, M. D. (2017) Sustainable Vehicles-Based Alternatives in Last Mile Distribution of Urban Freight Transport: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, v. 9, p. 1324.
- Perboli, G., Tadei, R. e Vigo, D. (2011) The two-echelon capacitated vehicle routing problem: models and math-based heuristics. *Transp Sci*, v. 45, p. 364-380. <https://doi.org/10.1287/trsc.1110.0368>
- Pina-Pardo, J. C., Moreno, M., Barros, M., Faria, A., Winkenbach, M. e Janjevic, M. (2022) Design of a two-echelon last-mile delivery model. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, v. 11, n. 100079.
- Poist, R. (1989) Evolution of conceptual approaches to design business logistics systems: a sequel. *Transportation Journal*, v. 28, n. 3, p.35-39.
- Redação E-Commerce Brasil. Com crescimento de 75%, e-commerce brasileiro representou 11% das vendas do varejo em 2020. Disponível em: <https://www.ecommercebrasil.com.br/noticias/e-commerce-brasileiro-vendas-varejo-2020/>. Acessado em 29 de junho de 2022.
- Robusto, C. C. (1957) The cosine-haversine formula. *The American Mathematical Monthly*, v. 64, n. 1, p. 38-40.
- Rodrigue, J. P., Slack, B., Comtois, C. (2001) The Paradoxes of Green Logistics Topic. In: *Proceedings of the 9th World Conference on Transport Research*, Seoul.
- Santos, E. C. e Aguiar, E. M. (2001) Transporte de Cargas em Áreas Urbanas. In: Caixeta-Filho, J. V. e Martins, R. S. *Gestão Logística do Transporte de Cargas*. Ed. Atlas, São Paulo, cap. 7, p. 182-208.
- Sardi, D. L., Bona, K. (2021) A Geometrical Structure-Based New Approach for City Logistics System Planning with Cargo Bikes and Its Application for the Shopping Malls of Budapest. *Applied Sciences*, v. 11, p. 3300.
- Savelsbergh, M. e Van Woensel, T. (2016) 50th Anniversary Invited Article – City Logistics: Challenges and Opportunities. *Transportation Science*, v. 50, n. 2, p. 579–590. <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0675>
- Taillard. E. (1999) A Heuristic Column Generation Method for the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem. *RAIRO (Operations Research)*, v. 33, p. 1-14.
- Taniguchi, E., Tadashi, Y. e Ron Van, D. C. (2001) *City Logistics: Network Modelling and Intelligent Transport Systems*. Amsterdam: Elsevier Science.
- The OpenStreetMap Foundation (2022) OpenStreetMap. Disponível em: <http://www.openstreetmap.org>. Acessado em: 05 de dezembro de 2022.
- Thinkseg (2022) Será que seguro de bike é caro? Disponível em: <https://blog.thinkseg.com/seguro-de-bicicleta-eletrica/#:~:text=Quanto%20custa%20o%20seguro%20de,do%20seguro%20de%20bicicleta%20e%20C3%A9trica>). Acessado em: 11 de junho de 2023.
- UNDP – United Nations Development Programme. What are the Sustainable Development Goals? Disponível em: https://www.undp.org/sustainable-development-goals/sustainable-cities-and-communities?gclid=Cj0KCQjwx5qoBhDyARIsAPbMagDvdAENMEmnFpCoLIsnxFoe4uHrbUVh0EHp-WQ91U1Vii7zTSS1GkaAgX4EALw_wcB. Acessado em 17 de setembro de 2023.
- Valente, A. M., Novaes, A. G., Passaglia, E. e Vieira, H. (2008) *Gerenciamento de Transporte e Frotas*. Ed. Cengage Learning, São Paulo.
- Veloseguro. Disponível em: <https://veloseguro.com/>. Acessado em: 11 de junho de 2023.

- Wang, Z. e Wen, P. (2020) Optimization of a Low-Carbon Two-Echelon Heterogeneous-Fleet Vehicle Routing for Cold Chain Logistics under Mixed Time Window. *Sustainability*, v. 12, n. 5, p. 1967.
- Winkenbach, M., Kleindorfer, P. R. e Spinler, S. (2016) Enabling Urban Logistics Services at La Poste through Multi-Echelon Location-Routing. *Transportation Science*, v. 50, n. 2, p. 363-761.
- Winkenbach, M. e Janjevic, M. (2018) Classification of Last-Mile Delivery Models for e-Commerce Distribution: A Global Perspective. In: Taniguchi, E. e Thompson, R. G. *City Logistics 1*. Ed. ISTE Ltd e John Wiley & Sons, Londres, p. 209-229.
- Young, J. [Infographic]. Ecommerce vs Retail Sales from 2012–2021. Disponível em: <https://www.digitalcommerce360.com/article/e-commerce-sales-retail-sales-ten-year-review/> (acessado em 29 de junho de 2022).
- Yu, V. F., Jodiawan, P., Hou, M. L. e Gunawan, A. (2021) Design of a Two-echelon Freight Distribution System in Last-mile Logistics Considering Covering Locations and Occasional Drivers. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 154, p. 102461.
- Zhao, Q. W., Wang, W., De Souza, R. (2018) Heterogeneous fleet two-echelon capacitated location-routing model for joint delivery arising in city logistics. *International Journal of Production Research*, v. 56, n. 15.

ANEXO A: CONSIDERAÇÕES DE CUSTOS DE VEÍCULOS

Este anexo sumariza o procedimento realizado para obter os parâmetros de custos e de capacidades dos veículos considerados no estudo de caso, isto é, de bicicletas, vans e caminhões.

Com relação ao uso de bicicletas na distribuição, considera-se que o veículo é composto por uma componente de tração, que é a bicicleta elétrica cargueira propriamente dita, e por uma componente de reboque da carga. Na **Figura 91**, está representado um tipo de bicicleta elétrica cargueira, utilizado como exemplo neste trabalho. E a **Figura 92** exemplifica um tipo de reboque com 3 rodas.



Figura 91: Exemplo de bicicleta elétrica cargueira (BikeMoto, 2023)

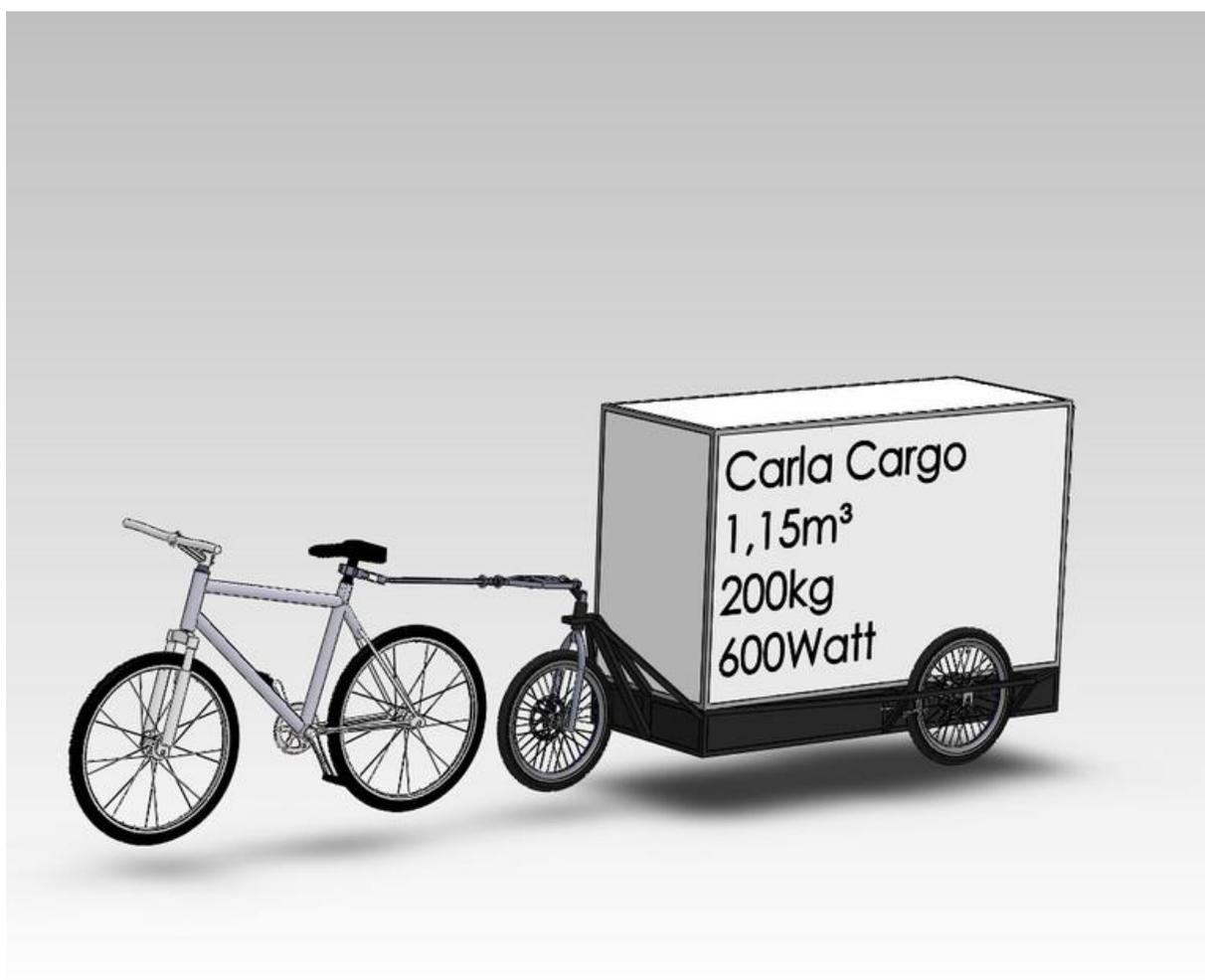


Figura 92: Exemplo de sistema de reboque com 3 rodas e capacidade de 200kg (Carla Cargo, 2023)

Alguns custos fixos e alguns custos variáveis para as bicicletas são obtidos através das **Equações A.1 a A.5** abaixo. Estas equações são geradas com base no método Leonês (Ferraz, 1999 apud Ferraz e Torres, 2004) e com a adoção de novas premissas e algumas simplificações. Isso porque o método Leonês foi originado para cálculos de transporte público urbano e este modelo é voltado para obtenção de custos de transporte de carga usando bicicletas. Os valores dos parâmetros utilizados nestas equações estão descritos na **Tabela A.1**.

As **Equações A.1 e A.2** permitem encontrar os custos médios mensais de remuneração de capital e de depreciação para bicicleta elétrica (CAP1) e para o reboque da bicicleta (CAP2). Os preços da bicicleta elétrica cargueira e do reboque cargo têm como referência o período de abril de 2023 e são obtidos a partir de projetos desenvolvidos pelo Centro de Inovação em

Sistemas Logísticos da USP (CISLog, 2023). A taxa de rentabilidade é adotada como o valor da taxa SELIC a. m., correspondente ao período de abril de 2023 (Conselho Federal de Contabilidade, 2023). E a vida útil e parcelas residuais são adotadas com base em cálculos de ciclos da bateria e em valores de referência encontrados em notícias (Miotto, 2021) e divulgados por empresas especializadas em bicicletas, que atendem a região de São Paulo (por exemplo, Nuflow, 2021).

$$CAP1 = [PON1(1 + TRE)^{VUT} - (RES1 \cdot PON1)] \left[\frac{TRE}{(1+TRE)^{VUT}-1} \right] \quad (A.1)$$

$$CAP2 = [PON2(1 + TRE)^{VUT} - (RES2 \cdot PON2)] \left[\frac{TRE}{(1+TRE)^{VUT}-1} \right] \quad (A.2)$$

Onde:

CAP1: custo mensal de capital da bicicleta elétrica (R\$/mês);

CAP2: custo mensal de capital do reboque cargo (R\$/mês);

PON1: preço da bicicleta elétrica cargueira (R\$);

PON2: preço do reboque cargo (R\$);

TRE: taxa mensal de rentabilidade do capital (%/mês);

RES1: parcela residual da bicicleta elétrica no final da vida útil (% do preço);

RES2: parcela residual do reboque cargo no final da vida útil (% do preço);

VUT: vida útil das bicicletas (meses).

A **Equação A.3** permite encontrar o custo médio com seguro mensal da bicicleta, calculado a partir do seguro anual, que corresponde a uma parcela do preço do veículo. Essa parcela é adotada com base em valores de referência encontrados em notícias (Thinkseg, 2022) e em cotações de empresas especializadas em seguros, que atendem a região de São Paulo (por exemplo, Velo Seguro, 2023).

$$SEM = \frac{SEA(PON1+PON2)}{12} \quad (A.3)$$

Onde:

SEM: custo de seguro mensal da bicicleta elétrica e reboque cargo (R\$/mês);

SEA: parcela do valor do veículo que representa o custo de seguro anual (% do preço);

PON1: preço da bicicleta elétrica cargueira (R\$);

PON2: preço do reboque cargo (R\$).

A **Equação A.4** permite encontrar o custo médio por km com manutenção de peças e acessórios. Esse custo é calculado a partir do custo médio mensal com manutenção, obtido a partir de valores de referência encontrados em notícias (Miotto, 2021 e Bike Registrada, 2022) e em cotações de empresas especializadas em bicicletas, que atendem a região de São Paulo.

$$PEAQ = \frac{PEA}{QME} \quad (A.4)$$

Onde:

PEAQ: custo por km da revisão de peças e acessórios (R\$/km);

PEA: custo mensal de revisão de peças e acessórios (R\$/mês);

QME: distância percorrida mensalmente (km/mês).

A **Equação A.5** permite encontrar o custo médio por km com pneus. Esse custo é calculado a partir do preço do pneu, obtido a partir de valores divulgados por empresas que comercializam esse tipo de insumo e da duração do pneu (Bike Registrada, 2022).

$$RODQ = \frac{PPN \cdot NPN}{DPN} \quad (A.5)$$

Onde:

PPN: custo por km com rodagem dos pneus (R\$/km);

PPN: preço do pneu (R\$);

NPN: número de pneus no veículo;

DPN: Duração total do pneu (Km/pneu).

Os demais custos fixos e variáveis das bicicletas são obtidos através de tabelas de frete (Guia do TRC, 2023). O custo fixo mensal com salário de motorista e o custo variável por km com lavagens e graxas, para bicicletas elétricas, são adotados, neste trabalho, como valores iguais aos custos divulgados para motocicletas nas tabelas de frete de abril de 2023.

Os custos fixos e variáveis dos demais tipos de veículos, ou seja, de vans e de caminhões, também são obtidos através de tabelas de frete (Guia do TRC, 2023), considerando a divulgação de abril de 2023. Para as vans, são adotados os custos médios da tabela de veículo do tipo furgão leve. A capacidade média de carga útil de furgões leves é de 650kg. Já para os caminhões, são adotados os custos médios das tabelas de caminhão semi-leve, que tem capacidade de carga útil

aproximada de 3 toneladas, de caminhão leve, com capacidade aproximada de 4 toneladas, e de caminhão médio, com capacidade aproximada de 6 toneladas. As tabelas de frete compreendem os custos fixos mensais e os custos variáveis, por km:

- Custo de depreciação (R\$/ mês);
- Custo de remuneração de capital (R\$/ mês);
- Custo de tributos federais e estaduais, como licenciamento, seguro obrigatório e IPVA (R\$/ mês);
- Custos com salário de motorista e encargos sociais (R\$/ mês);
- Custos com salário de ajudante e encargos sociais (R\$/ mês);
- Custo com seguro do casco (R\$/ mês);
- Custo de despesas de comunicação (R\$/ mês);
- Custo de manutenção (R\$/km);
- Custo de pneus, câmaras e recapagens (R\$/km);
- Custo de combustível (R\$/km);
- Custo de óleo de cárter (R\$/km);
- Custo de lavagens e graxas (R\$/km).

Vale observar que para converter os custos fixos mensais em custos fixos horários, conforme descritos na **Tabela 1 do Item 3** de método, os custos mensais são divididos pelas 168 horas úteis adotadas para 1 mês, que corresponde a operação dos veículos durante 8 horas por dia, em 21 dias úteis por mês.

Tabela 7: Parâmetros do modelo de custos para obtenção dos custos fixos mensais de bicicletas

Parâmetro	Descrição do parâmetro	Valor	Unidade de medida
PON1	Preço da bicicleta elétrica cargueira 800W	8700	Reais (R\$)
PON2	Preço do reboque cargo, com 3 rodas e capacidade de 200kg	5000	Reais (R\$)
TRE	Taxa mensal de rentabilidade de capital (SELIC a. m.)	0,0092%	%/mês
VUT	Vida útil da bicicleta elétrica e do reboque cargo	60	Meses
RES1	Parcela residual da bicicleta elétrica no final da vida útil	0%	% do preço
RES2	Parcela residual do reboque cargo no final da vida útil	50%	% do preço
SEA	Parcela do valor do veículo que representa o custo de seguro anual	7 a 10%	% do preço

Tabela 8: Parâmetros do modelo de custos para obtenção dos custos variáveis por km para bicicletas

Parâmetro	Descrição do parâmetro	Valor	Unidade de medida
PEA	Custo mensal de revisão de peças e acessórios	120	R\$/mês
QME	Distância percorrida mensalmente	882	Km/mês
PPN	Preço do pneu	50	Reais (R\$)
NPN	Número de pneus no veículo	5	Pneu/veículo
DPN	Duração total do pneu	5000	Km/pneu

ANEXO B: ANÁLISES DE DIMENSÕES E DESIGNAÇÃO DE FROTA CONSIDERANDO DIFERENTES DISTÂNCIAS DE LINE-HAUL

Este anexo sumariza os resultados das análises de dimensões e designação de frota, considerando distâncias de *line-haul* diferentes das reais.

No problema abordado no estudo de caso, há um depósito satélite dentro da cidade, de localização conhecida, e que atende todo o território de entregas. O território de entregas, por sua vez, é subdividido em partes, considerando diferentes tipos de divisão, como em setores censitários, em segmentos de 0,25km², em segmentos de 1km², em segmentos de 4km², em segmentos de 9km² e em distritos administrativos. Cada parte do território deve ser designada para ser atendida por um dos tipos de veículo da frota heterogênea de segundo estágio. Nesse sentido, existe uma distância a ser percorrida entre o depósito satélite e cada distrito de clientes – a distância de *line-haul*.

Nos resultados considerando as distâncias reais de *line-haul*, observou-se que as dimensões da frota aumentam, à medida que as áreas dos segmentos usados no dimensionamento aumentam. Tendo isso em vista, busca-se compreender se esse comportamento de aumento da dimensão da frota para divisões em áreas maiores ocorre independentemente das distâncias de *line-haul*. Nessa linha, o cenário real é comparado com um cenário alternativo i, em que as distâncias de *line-haul* são nulas, e com um cenário alternativo ii, em que as distâncias de *line-haul* equivalem a metade das distâncias reais. Esses dois cenários alternativos consideram as seguintes premissas: i) cada distrito logístico apresenta um depósito satélite dentro das suas delimitações e, por conta disso, a distância de *line-haul* é anulada; ii) há dois depósitos satélite servindo os distritos e, por conta disso, as distâncias de *line-haul* são equivalentes a metade das distâncias de *line-haul* do cenário real de depósito único.

Os resultados são apresentados nas **Figuras 93 a 98**. A partir dos gráficos, pode-se observar que nos três cenários de *line-haul*, a dimensão da frota resulta maior para divisões em segmentos de maior área, isto é, de 4km² e de 9km². Enquanto em segmentos de menor área, como de 0,25km², a dimensão da frota resulta menor.

Outro aspecto importante observado é que os cenários diferentes de *line-haul* produz diferenças maiores no número de veículos do tipo bicicleta. No caso do número de vans, há um

aumento aproximado de 1 van, comparando os cenários de *line-haul* zero e *line-haul* real. Já no caso do número de bicicletas, o aumento chega a 20 veículos, comparando os cenários de *line-haul* zero e *line-haul* real, em dia de alta demanda.

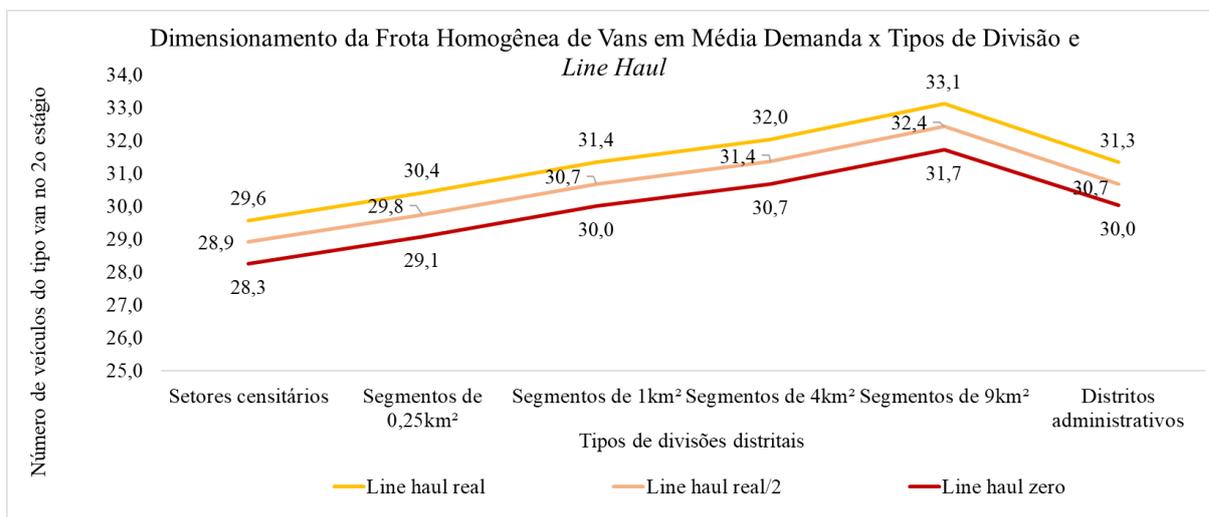


Figura 93: Gráfico da dimensão da frota homogênea de vans para atender o segundo estágio no cenário de média demanda x tipos de divisões distritais e de *line-haul* (elaboração própria)

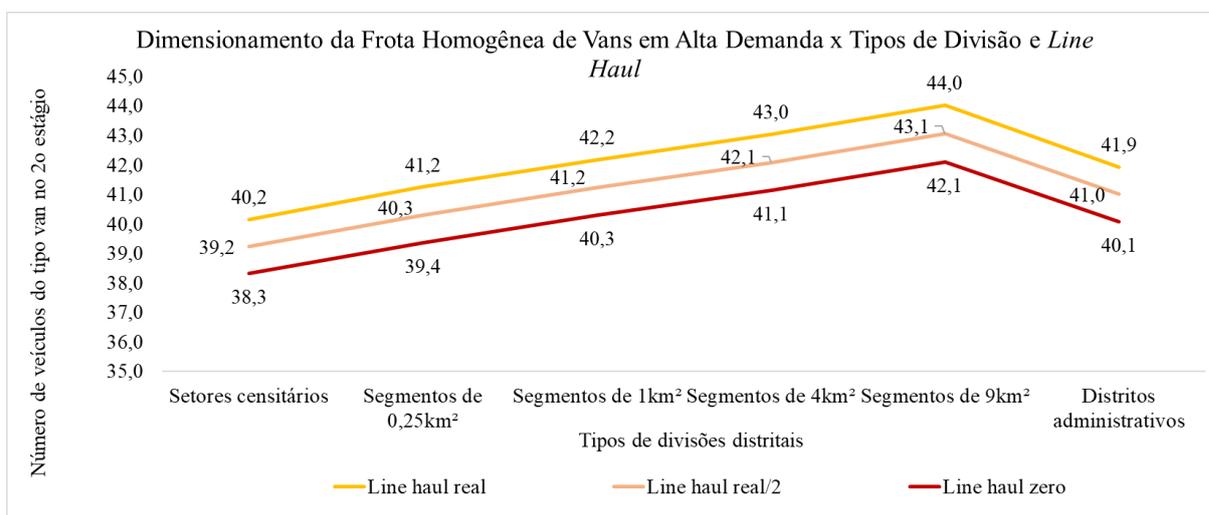


Figura 94: Gráfico da dimensão da frota homogênea de vans para atender o segundo estágio no cenário de alta demanda x tipos de divisões distritais e de *line-haul* (elaboração própria)

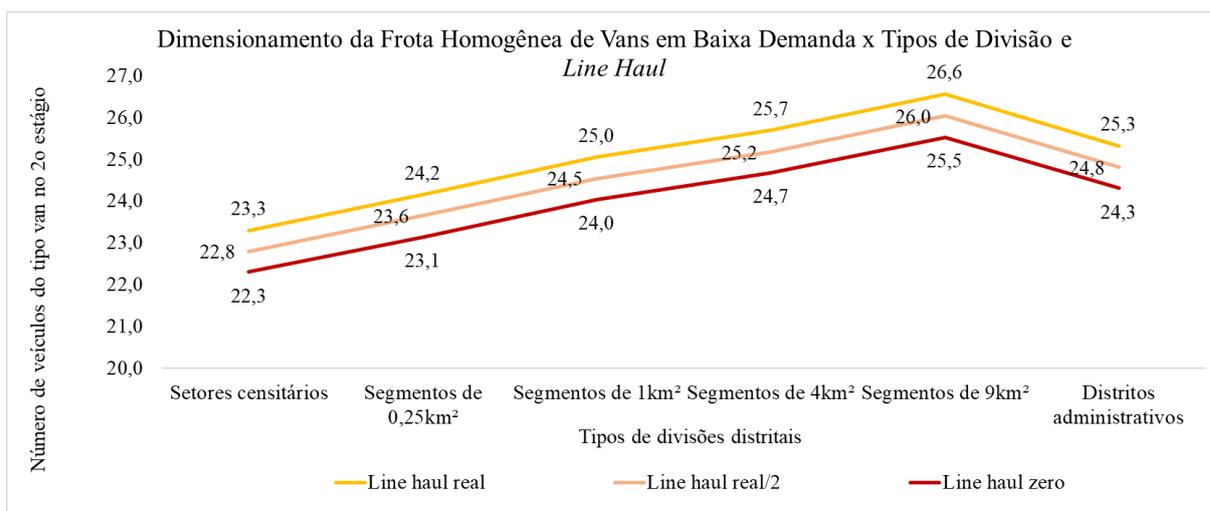


Figura 95: Gráfico da dimensão da frota homogênea de vans para atender o segundo estágio no cenário de baixa demanda x tipos de divisões distritais e de *line-haul* (elaboração própria)

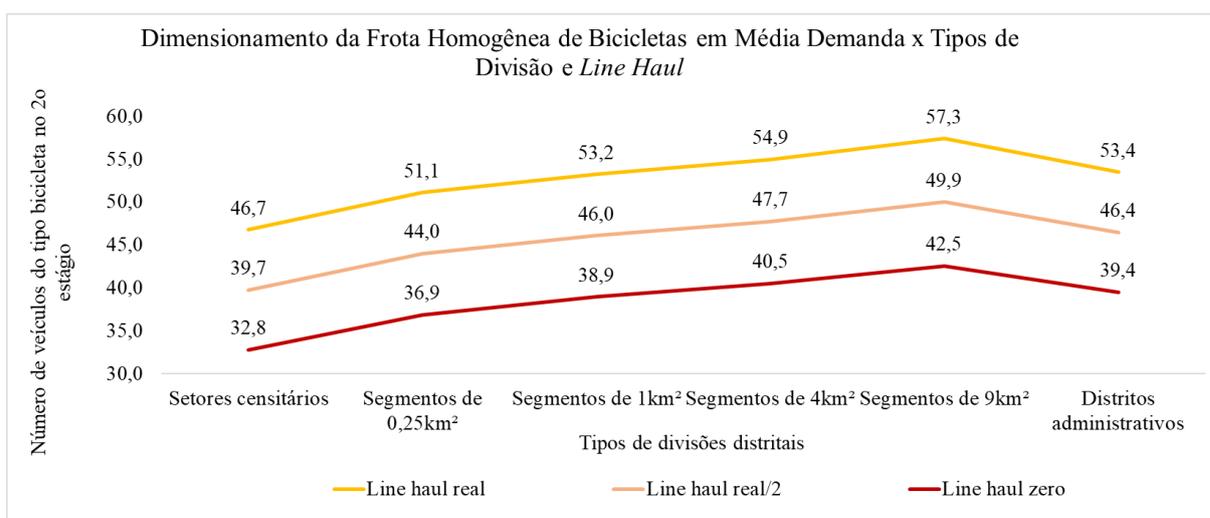


Figura 96: Gráfico da dimensão da frota homogênea de bicicletas para atender o segundo estágio no cenário de média demanda x tipos de divisões distritais e de *line-haul* (elaboração própria)

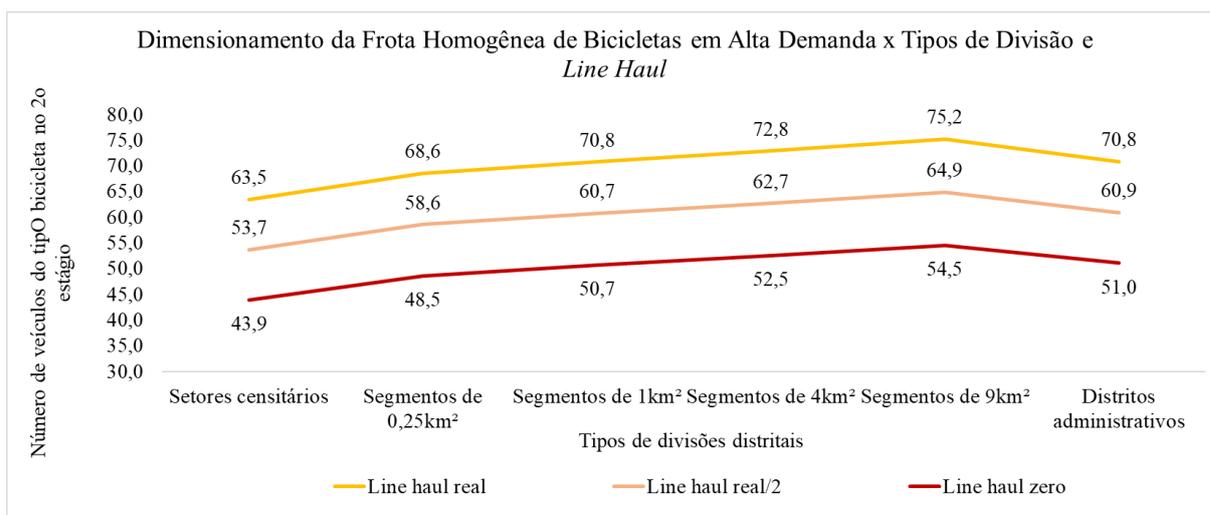


Figura 97: Gráfico da dimensão da frota homogênea de bicicletas para atender o segundo estágio no cenário de alta demanda x tipos de divisões distritais e de *line-haul* (elaboração própria)

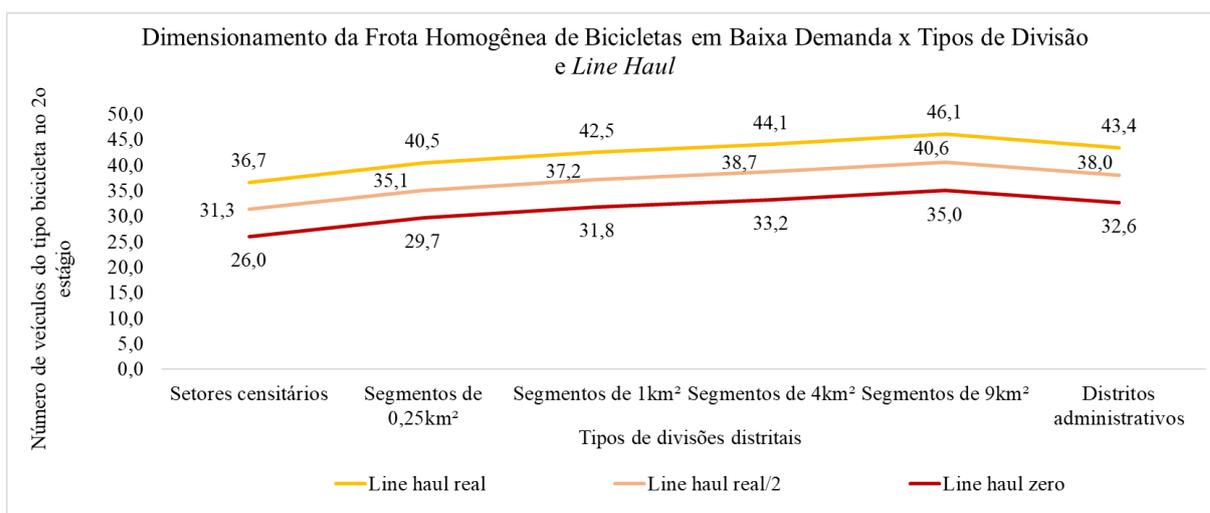


Figura 98: Gráfico da dimensão da frota homogênea de bicicletas para atender o segundo estágio no cenário de baixa demanda x tipos de divisões distritais e de *line-haul* (elaboração própria)

Nos resultados considerando as distâncias reais de *line-haul*, observou-se que as áreas próximas ao depósito satélite são designadas para atendimento pelo modo bicicleta, e as áreas mais distantes do depósito satélite são designadas para vans. Em razão disso, busca-se compreender se a distância de *line-haul* é o fator que mais influencia a designação para modo

bicicleta. Nesse sentido, são gerados dois cenários alternativos, considerando as seguintes premissas: i) cada segmento de 1km^2 apresenta um depósito satélite dentro das suas delimitações e, por conta disso, a distância de *line-haul* é nula, e ii) há dois depósitos satélite servindo a área de entrega e, por conta disso, as distâncias de *line-haul* são equivalentes a metade das distâncias de *line-haul* do cenário real de depósito único.

Os resultados são apresentados nas **Figuras 99 a 104**. A partir das figuras, pode-se observar que nos três cenários de demanda, quando as distâncias de *line-haul* são nulas, os segmentos ficam predominantemente atribuídos para distribuição por bicicletas. E quando as distâncias de *line-haul* são equivalentes a 50% das distâncias reais, a designação de segmentos para atendimento por bicicleta aumenta em torno do satélite. Depreende-se, dessa forma, que a distância de *line-haul* influencia de forma relevante a designação para modo bicicleta, e que o modo bicicleta se mostra mais eficiente em custos para viagens de curtas distâncias.

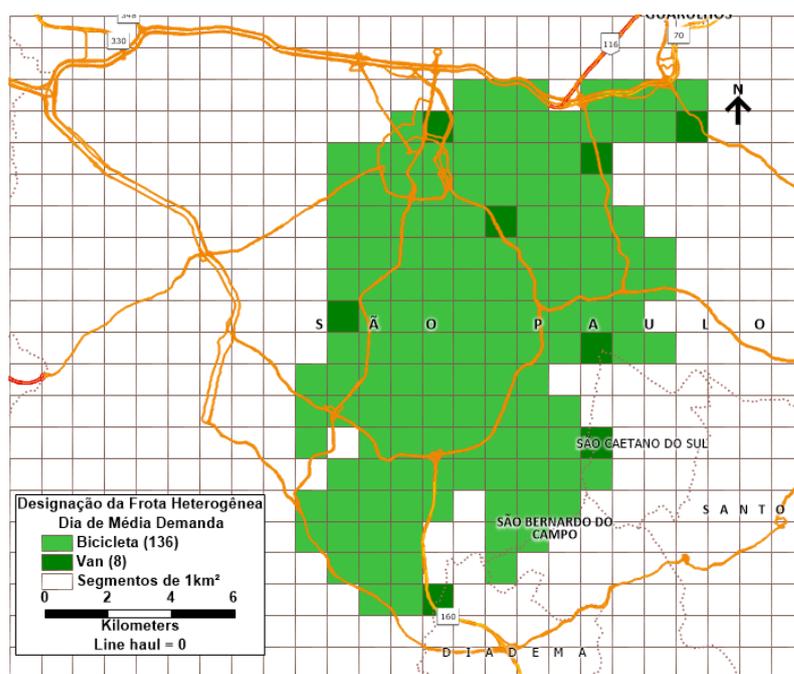


Figura 99: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 1km^2 em dia de média demanda, considerando distância de *line-haul* nula (elaboração própria)

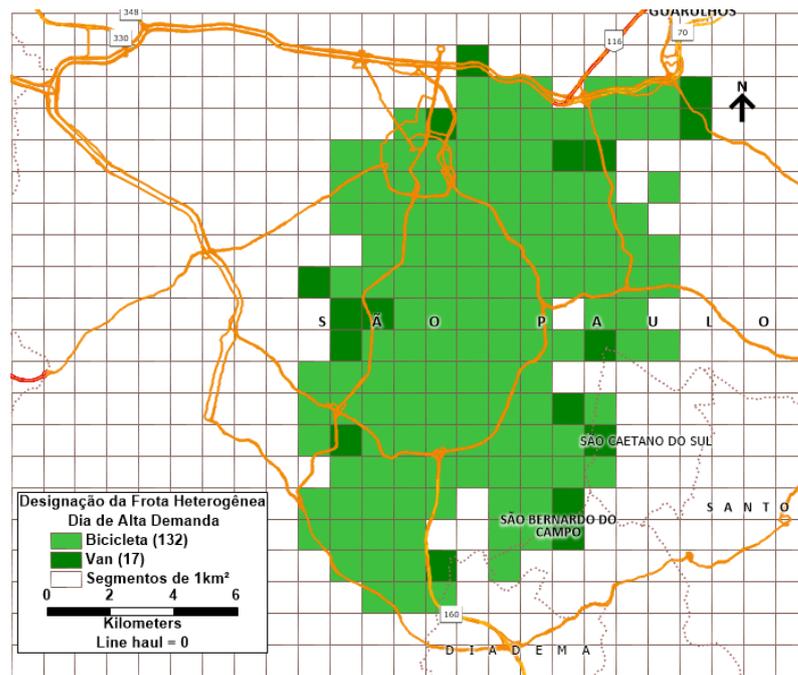


Figura 100: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 1km² em dia de alta demanda, considerando distância de *line-haul* nula (elaboração própria)

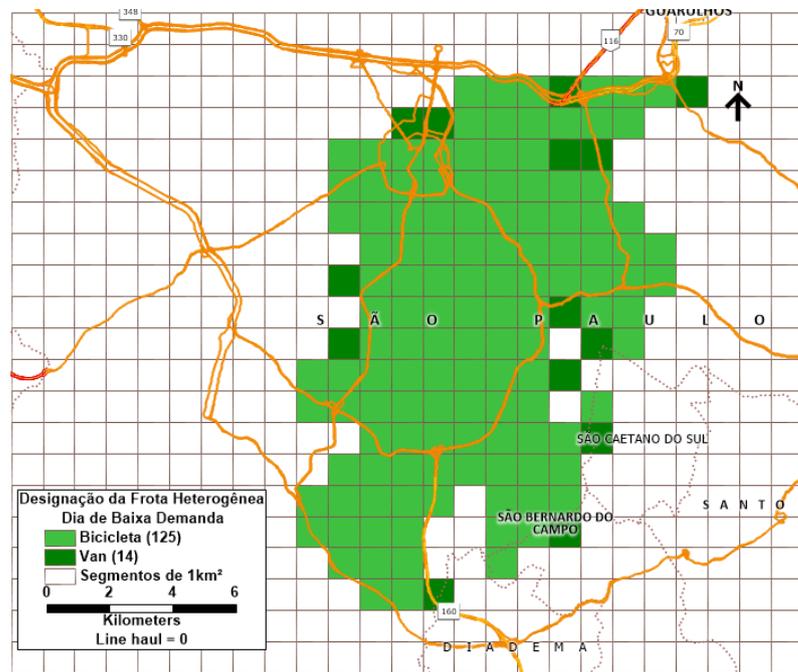


Figura 101: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 1km² em dia de baixa demanda, considerando distância de *line-haul* nula (elaboração própria)

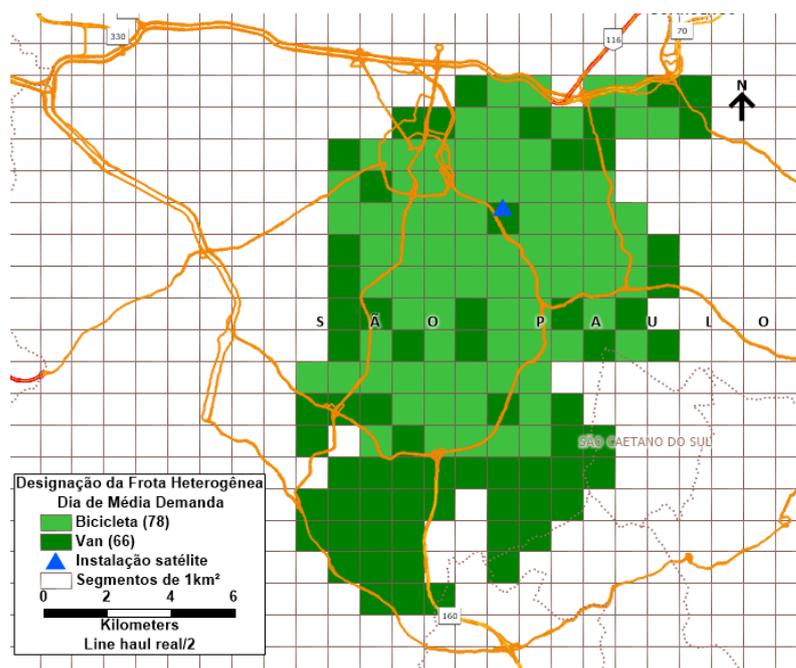


Figura 102: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 1km² em dia de média demanda, considerando distâncias de *line-haul* equivalentes a 50% das reais (elaboração própria)

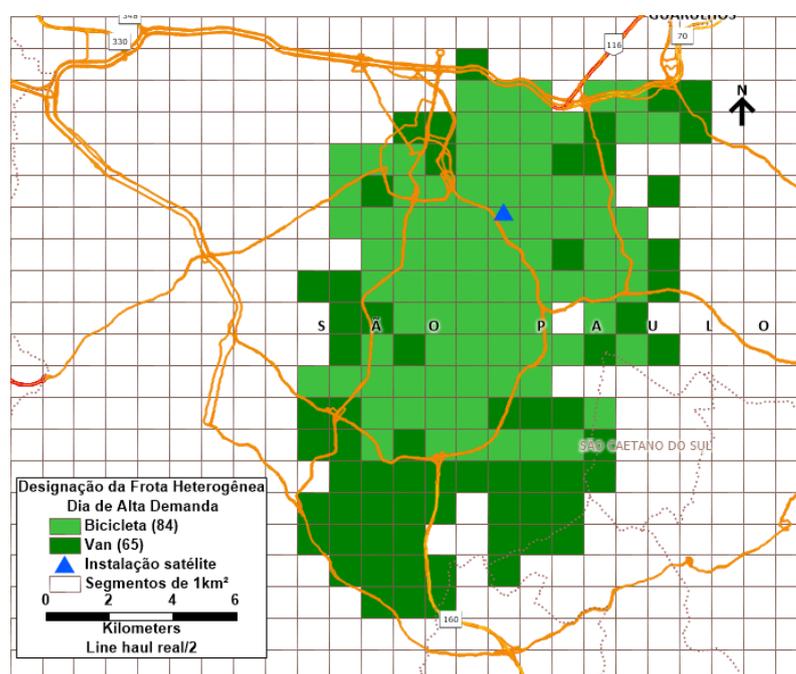


Figura 103: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 1km² em dia de alta demanda, considerando distâncias de *line-haul* equivalentes a 50% das reais (elaboração própria)

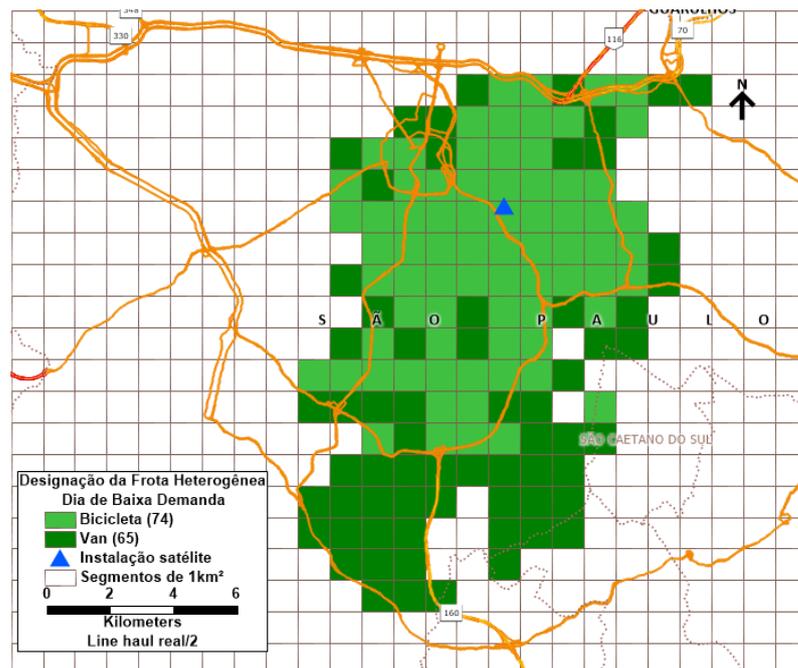


Figura 104: Mapa temático representando a designação ótima da frota heterogênea de vans e bicicletas, para atendimento dos segmentos de 1km² em dia de baixa demanda, considerando distâncias de *line-haul* equivalentes a 50% das reais (elaboração própria)