



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

WENDY FERNANDES LAVIGNE QUINTANILHA

**ANÁLISE DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E EMISSÃO DE POLUENTES DE
VEÍCULOS *FLEX FUEL* EM DIFERENTES TIPOS DE VIA NA CIDADE DE
FORTALEZA - CEARÁ**

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- Q68a Quintanilha, Wendy Fernandes Lavigne.
Análise de consumo de combustível e emissão de poluentes de veículos flex fuel em diferentes tipos de via na cidade de Fortaleza - Ceará / Wendy Fernandes Lavigne Quintanilha. – 2017.
101 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini.
1. Emissões veiculares. 2. PEMS. 3. Flex fuel. 4. Vias urbanas. I. Título.

CDD 620

WENDY FERNANDES LAVIGNE QUINTANILHA

ANÁLISE DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E EMISSÃO DE POLUENTES DE
VEÍCULOS *FLEX FUEL* EM DIFERENTES TIPOS DE VIA NA CIDADE DE
FORTALEZA - CEARÁ

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini

FORTALEZA

2017

WENDY FERNANDES LAVIGNE QUINTANILHA

ANÁLISE DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E EMISSÃO DE POLUENTES DE
VEÍCULOS *FLEX FUEL* EM DIFERENTES TIPOS DE VIA NA CIDADE DE
FORTALEZA - CEARÁ

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 13/12/2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Bruno Vieira Bertoncini, D.Sc. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Veronica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Jefferson Pereira Ribeiro, D.Sc.
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Rô e Paulo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, porque Ele acima de todas as coisas.

Aos meus pais, por tudo o que me ofereceram e proveram ao longo da minha vida, inclusive a mesma, e por serem partes fundamentais de quem sou hoje.

Ao Ahmed, por ter me ajudado a crescer tanto, e por continuar ao meu lado.

Ao professor Bruno Bertoncini, por ter me aceitado mesmo tendo diversas outras atribuições, e por ter me oferecido a oportunidade de me inserir neste projeto. E por quem tenho uma profunda admiração.

Ao Cassiano, por toda paciência, disposição, orientação, suporte, e tudo o mais, que certamente foram decisivos para desenvolvimento deste trabalho.

Ao Diego, por toda a sua ajuda e paciência comigo.

Aos meus colegas do GTTEMA, por me acolherem e auxiliarem.

Aos meus amigos Marília, Geovanny, Gledson, Marina, Renan, Mariana, Lucas e Lília, sem os quais não teria sido possível encerrar esta caminhada, e com os quais espero continuar caminhando.

Ao Flix, por ter entrado na minha vida e alegrado os meus dias.

“...aquele homem acredita saber alguma coisa, sem sabê-la, enquanto eu, como não sei nada, também estou certo de não saber” (Platão)

RESUMO

O crescente número de veículos, principalmente do tipo *flex fuel* que hoje representam 35% da frota nacional, associado ao planejamento urbano ineficiente, geram diversos impactos negativos na sociedade, em especial em relação à qualidade do ar devido à emissão de poluentes pela combustão. Essa emissão é associada à interação da dinâmica veicular com o meio, sendo influenciada por diversos outros fatores. Este trabalho propôs avaliar a influência da classificação viária nessa dinâmica, considerando áreas de diferentes características de adensamento urbano, padrão de uso do solo e, ainda, diferentes horários do dia. Foram realizadas coletas *on-board*, utilizando um sistema de medição de emissões portátil (PEMS) e gasolina como único combustível, obtendo ciclos de condução reais e resultados instantâneos de consumo de combustível e emissão de CO₂ e NO_x. O adensamento forneceu indícios do perfil de comportamento dos veículos nas vias ao longo do dia, porém não sendo sensível o suficiente para comparar regiões de diferentes graus de adensamento. Observou-se a influência de lotes de uso comercial ou misto e de interseções semaforizadas na ocorrência de picos de emissão de CO₂ e consumo de combustível. Ainda, verificou-se que eventos de *stop-and-go* interferem na emissão de NO_x, porém o período do dia apresenta-se como fator de maior impacto nas emissões desse poluente. Além disso, a temperatura ambiente mostrou-se relevante no processo de emissão de NO_x. Vias arteriais revelaram sofrer pouca influência quanto ao horário do dia, porém, com intensificação em um dos sentidos (ida ou volta). Vias locais e coletoras apresentaram maior variação nos perfis de consumo e emissão ao longo do dia, entretanto com comportamentos variados a depender da região. Conclui-se, por fim, que uma análise agregada (agrupando vias de mesma classificação funcional ou regiões diferentes) pode não fornecer sensibilidade suficiente quanto ao comportamento das vias, pois desconsidera características da região e do entorno da via que podem afetar o consumo de combustível e a emissão de poluentes.

Palavras-chave: Emissões veiculares. PEMS. *Flex fuel*. Vias urbanas.

ABSTRACT

The growing number of vehicles, mainly of the flex fuel type, which now accounts for 35% of the national fleet, associated with inefficient urban planning, generates several negative impacts on society, especially regarding air quality due to emission of air pollutants through combustion. This emission is associated with the interaction of the vehicle dynamics with the environment and it is influenced by several other factors. This research proposes evaluating the influence of road classification on this dynamic, considering areas of different characteristics of urban density, land use patterns and, also, different times of the day. On-board collections were performed, using a PEMS and gasoline as the only fuel, obtaining real driving cycles and instantaneous results of fuel consumption and emission of CO₂ and NO_x. Density provided indications of road behaviour throughout the day, but not being sensitive enough to compare regions of different degrees of density. The influence of commercial or mixed (both residential and commercial) use and signalised intersections was observed in the occurrence of peaks of CO₂ emissions and fuel consumption. It was also observed that stop-and-go events interfere with NO_x emissions, but the period of the day has a major impact on the emissions of this pollutant. In addition, the air temperature proved to be relevant in the NO_x emission process. Time of the day showed little influence on arterial roads, but manifesting intensification on one of its ways. Local and collector roads showed greater variation in consumption and emission profiles throughout the day, however with different behaviours depending on the region. It is concluded that an aggregated analysis (grouping roads of the same classification or different regions) may not provide sufficient sensitivity as to the behaviour of the roads, since it disregards characteristics of the region and of the surroundings of the road that can affect fuel consumption and emission of pollutants.

Keywords: Vehicular emissions. PEMS. Flex fuel. Urban roads.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ciclo causal entre uso do solo e transportes.....	23
Figura 2 – Limites de emissão para veículos novos leves ao longo dos anos em g/km	32
Figura 3 – Ciclo Otto	34
Figura 4 – Esquema de funcionamento do sensor de combustível do motor flex fuel.....	35
Figura 5 – Esquema de escolha de materiais	36
Figura 6 – Classificação viária de Fortaleza–CE.....	37
Figura 7 – Vias selecionadas da Área 1	37
Figura 8 – Vias selecionadas da Área 2	38
Figura 9 – Densidade residencial na cidade de Fortaleza-CE	39
Figura 10 – Densidade comercial na cidade de Fortaleza-CE.....	39
Figura 11 – Padrão de uso do solo da Área 1	40
Figura 12 – Padrão de uso do solo da Área 2	40
Figura 13 – Procedimento geral para coleta	42
Figura 14 – Esquema geral de coleta e processamento de dados	43
Figura 15 – Carregamento das vias de Fortaleza.....	44
Figura 16 – Ciclos de condução da av. 13 de Maio.....	47
Figura 17 – Ciclos de condução da av. Jovita Feitosa	48
Figura 18 – Ciclos de condução da rua Érico Mota	49
Figura 19 – Velocidades médias para vias da Área 1	49
Figura 20 – Ciclos de condução da av. Sen. Virgílio Távora.....	50
Figura 21 – Ciclos de condução da rua Tibúrcio Cavalcante	51
Figura 22 – Ciclos de condução da rua Vicente Linhares	51
Figura 23 – Velocidades médias para vias da Área 2	52
Figura 24 – Velocidades médias das Áreas 1 e 2.....	52
Figura 25 – Consumo de combustível no fora pico (Área 1)	57
Figura 26 – Consumo de combustível no fora pico (Área 2)	58
Figura 27 – Consumo de combustível no pico (Área 1).....	59
Figura 28 – Consumo de combustível no pico (Área 2).....	60
Figura 29 – Emissão de CO ₂ no fora pico (Área 1).....	62
Figura 30 – Emissão de CO ₂ no fora pico (Área 2).....	63
Figura 31 – Emissão de CO ₂ no pico (Área 1)	64
Figura 32 – Emissão de CO ₂ no pico (Área 2)	65

Figura 33 – Emissão de NO _x no fora pico (Área 1).....	67
Figura 34 – Emissão de NO _x no fora pico (Área 2).....	68
Figura 35 – Emissão de NO _x no pico (Área 1).....	70
Figura 36 – Emissão de NO _x no pico (Área 2).....	71
Quadro 1 – Efeitos dos poluentes atmosféricos na saúde e no meio ambiente	21
Quadro 2 – Vias selecionadas	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fases do PROCONVE	31
Tabela 2 - Especificações do veículo.....	41
Tabela 3 – Valores médios de emissão e consumo para a Área 1	53
Tabela 4 – Valores médios de emissão e consumo para a Área 2.....	54
Tabela 5 – Valores médios de emissão e consumo para a av. 13 de Maio (fora pico).....	73
Tabela 6 – Valores médios de emissão e consumo para a av. 13 de Maio (pico)	74
Tabela 7 – Valores médios de emissão e consumo para a av. Jovita Feitosa (fora pico)	74
Tabela 8 – Valores médios de emissão e consumo para a av. Jovita Feitosa (pico)	75
Tabela 9 – Valores médios de emissão e consumo para a rua Érico Mota	75
Tabela 10 – Resultado do teste de hipóteses para a Área 1	76
Tabela 11 – Valores médios de emissão e consumo para av. Sen. Virgílio Távora (fora pico)	77
Tabela 12 – Valores médios de emissão e consumo para a av. Sen. Virgílio Távora (pico)	77
Tabela 13 – Valores médios de emissão e consumo para a rua Tibúrcio Cavalcante	78
Tabela 14 – Valores médios de emissão e consumo para a rua Vicente Linhares	78
Tabela 15 – Resultado do teste de hipóteses para a Área 2	79
Tabela 16 – Vias arteriais.....	80
Tabela 17 – Vias coletoras	80
Tabela 18 – Vias locais	81
Tabela 19 – Teste de hipóteses para as diferentes classificações funcionais	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBT	Código Brasileiro de Trânsito
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HC	Hidrocarbonetos
IF	Infravermelho
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
LUOS	Lei de Uso e Ocupação do Solo
MOVES	<i>Motor Vehicle Emission Simulator</i>
MP	Material Particulado
MP10	Material Particulado de tamanho aerodinâmico médio menor que 10 μm
NMHC	Hidrocarbonetos não metano
OBD	<i>On-Board Diagnostic</i>
PEMS	<i>Portable Emission Measurement System</i>
POP	Poluente Orgânico Persistente
Proálcool	Programa Nacional do Álcool
PROCONVE	Programa de Controle e Emissão do Ar por Veículos Automotores
THC	Hidrocarbonetos totais
UFC	Universidade Federal do Ceará
UV	Ultravioleta
VOC	Composto Volátil Orgânico

LISTA DE SÍMBOLOS

CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
H ₂ O	Água
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
NH ₃	Amônia
NO	Óxido nítrico
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
NO _x	Óxidos de nitrogênio
O ₂	Oxigênio
RCHO	Aldeídos
s	Desvio padrão amostral
SO ₂	Dióxido de enxofre
SO ₃	Trióxido de enxofre
SO _x	Óxidos de enxofre

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Problema de Pesquisa	16
1.2	Questões Motivadoras	16
1.3	Justificativa	17
1.4	Objetivos	17
1.4.1	<i>Objetivo geral</i>	17
1.4.2	<i>Objetivos específicos</i>	17
2	EMISSÕES VEICULARES	18
2.1	Poluentes atmosféricos	18
2.2	Emissões veiculares em áreas urbanas	22
3	QUANTIFICAÇÃO E MONITORAMENTO DE EMISSÕES VEICULARES ..	28
3.1	Métodos de coleta de emissões veiculares	28
3.2	Legislação	29
4	VEÍCULOS FLEX FUEL	33
5	MATERIAIS E MÉTODOS	36
5.1	Materiais utilizados	36
5.1.1	<i>Local de estudo</i>	36
5.1.2	<i>Veículo utilizado</i>	41
5.1.3	<i>Equipamento de coleta</i>	41
5.2	Métodos utilizados	42
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
6.1	Ciclo de condução	46
6.2	Adensamento urbano	53
6.3	Padrão de uso do solo	55
6.3.1	<i>Consumo de combustível</i>	56
6.3.2	<i>Dióxido de carbono</i>	61
6.3.3	<i>Óxidos de nitrogênio</i>	66
6.3.4	<i>Avaliação geral</i>	72
6.4	Volume de tráfego	73
6.4.1	<i>Área 1</i>	73
6.4.2	<i>Área 2</i>	76
6.4.3	<i>Classificação funcional</i>	79
6.5	Limites de emissão	83
7	CONCLUSÃO	85
	REFERÊNCIAS	87
	APÊNDICE A – CONSUMO DE COMBUSTÍVEL (FORA PICO)	95
	APÊNDICE B – CONSUMO DE COMBUSTÍVEL (PICO)	96
	APÊNDICE C – EMISSÃO DE CO₂ (FORA PICO)	97
	APÊNDICE D – EMISSÃO DE CO₂ (PICO)	98
	APÊNDICE E – EMISSÃO DE NO_x (FORA PICO)	99
	APÊNDICE F – EMISSÃO DE NO_x (PICO)	100
	ANEXO A – RESULTADO DA ANÁLISE DE COMBUSTÍVEL	101

1 INTRODUÇÃO

As cidades brasileiras, por muitas décadas, cresceram sem nenhum ou pouco planejamento urbano, ocasionando diversos problemas, como alterações desordenadas no padrão de uso do solo, detrimento do transporte coletivo e sobrecarregamento de vias. Em um estudo feito pela *TomTom Traffic Index* em 189 grandes cidades do mundo (mais de 800 mil habitantes), nove capitais brasileiras aparecem no *ranking* de cidades mais congestionadas, com o Rio de Janeiro ocupando a 8ª posição, subindo para a 5ª posição quando foram comparadas apenas as cidades com mais de 8 milhões de habitantes; seguida por Salvador na 28ª colocação, e a cidade de Fortaleza-CE ocupa a 47ª posição nessa lista (TOMTOM TRAFFIC INDEX, 2016).

Em Fortaleza-CE, a necessidade de uma melhor organização impulsionou o surgimento do Plano de Mobilidade de Fortaleza (PLANMOB), visando articular a sociedade “de forma participativa para reduzir as desigualdades sociais, garantir a acessibilidade, otimizar os deslocamentos de pessoas e bens” (INSTITUTO DO PLANEJAMENTO DE FORTALEZA, 2015), sempre tentando reduzir os impactos ao meio ambiente, promovendo a conservação ambiental.

A preservação ambiental tem sido o foco de diversas áreas de pesquisa nos últimos anos, e também é um dos objetivos do planejamento urbano. Não só como forma de reverter ações já causadas, como detrimento da qualidade do ar, mas como uma busca de meios alternativos que tenham menor efeito no ambiente. É sabido que o setor de transportes gera grandes repercussões na sociedade, tanto por seu impacto ambiental, quanto por sua infraestrutura e operação.

Como mencionado, a presença de veículos impacta em uma região. Esta não apenas exige a implementação de vias com infraestrutura adequada para sua circulação, mas também exige uma organização para tal circulação ocorrer da melhor maneira possível. Segundo o Código Brasileiro de Trânsito (CBT), as vias urbanas são classificadas em quatro tipos: trânsito rápido, arterial, coletora e local; cada uma com funções e características específicas, de modo a colaborar com os deslocamentos entre regiões da cidade. Desta forma, conhecer como a funcionalidade de uma via repercute no desenvolvimento da cidade e na vida dos cidadãos pode fornecer mais uma perspectiva para o planejamento urbano.

Ao se avaliar os impactos ambientais de veículos, geralmente, consideram-se as emissões lançadas devido à combustão, completa ou incompleta, do combustível utilizado.

Alguns dos produtos gerados são bastante agressivos para a saúde populacional e o meio ambiente, como o dióxido de carbono (CO₂) e os óxidos de nitrogênio (NO_x) (CASSIANO, 2016). Segundo o *Internatinal Transport Forum* (ITF), 23% das emissões mundiais de CO₂ e 15% dos gases do efeito estufa são provenientes do setor de transportes (IINSTITUTE TRANSPORT FORUM, 2010).

Diversos fatores influenciam a emissão de poluentes por um veículo, como velocidade, aceleração, inclinação da via, características do fluxo, especificações do veículo e tipo de combustível. (JIMÉNEZ-PALACIOS, 1999; XIAO; DUI-JIA; JUN-MIN, 2012; CARVALHO, 2014; ELFASAKHANY, 2016). Um fator de grande relevância é o ciclo de condução, que, em resumo, é o comportamento usual do veículo no tráfego de uma região (RODRÍGUEZ *et al.*, 2016). Ele é utilizado para modelagem de tráfego e de emissões, e é afetado, diretamente, pelas características funcionais das vias urbanas. Velocidade máxima, presença de semáforos ou interseções, travessia de pedestres em nível e acesso a lotes lindeiros são aspectos que definem o tipo de via e que impactam diretamente o comportamento do tráfego, e, conseqüentemente, o consumo de combustível e a emissão de poluentes.

Como citado anteriormente, o tipo de combustível também é um fator determinante na emissão de poluentes, pois sua composição química define o tipo de combustão e os produtos finais gerados. Durante o final do século XX e início do século XXI, muitos eventos colaboraram para alterações bruscas no preço do petróleo. Como uma forma de se tornar mais independente desse insumo, não apenas pela sua inconstância no mercado, mas, também, como um meio de se reduzir o impacto ambiental gerado pela sua utilização (FRANCISCO, 2017) e estimular o agronegócio, o Brasil deu início, na década de 1970, ao Programa Nacional do Álcool (Proálcool), que estimula a produção de álcool, com foco nos combustíveis automotivos, pelo Decreto nº 76.593.

Com o avanço tecnológico promovido pelo Proálcool, em 2003, os carros *flex fuel* surgiram no mercado nacional. Em três anos, esses veículos já representavam 77% das vendas de automóveis e, em 2016, correspondiam a cerca de 86% da produção (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES, 2017). Hoje, constituem 35% da frota circulante no Brasil (DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO, 2016), e sua proporção ano a ano cresce rapidamente. Fortaleza-CE possui a 10ª maior frota de automóveis do país, com 566.423 unidades. Deste número, cerca de 44% é de carros *flex*, próximo à proporção nacional (DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO, 2016). Essa preferência se dá, principalmente, por permitir a escolha entre a gasolina e o

álcool, ou uma mistura dos dois combustíveis. Isso demonstra, claramente, a necessidade de se estudar os efeitos causados por esses veículos ao meio ambiente.

Diante do exposto, com a quantificação e a qualificação do consumo de combustível e das emissões de poluentes, associados às classificações das vias utilizadas, será possível traçar os perfis de consumo e emissão. Isso permitirá verificar a existência, ou não, de diferenciação no perfil de consumo e emissão quando em diferentes tipos de via, que poderão auxiliar na determinação de parâmetros de calibração que considerem as características das vias no planejamento urbano e no controle de emissão de fontes móveis, conforme prevê o Programa de Controle de Emissão do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE).

1.1 Problema de Pesquisa

No Brasil, a quantificação e qualificação do consumo de combustível e emissão de poluentes é um assunto pouco estudado e, quando feito, é realizado através de métodos que não representam a realidade, o que já se comprovou através de diversos estudos (TZIRAKIS *et al.*, 2006; ACHOUR, CARTON e OLABI, 2011; AKÇELIK, SMIT e BESLEY, 2012; DUARTE, GONÇALVES e FARIAS, 2016; FONTARAS, ZACHAROF e CIUFFO, 2017).

Além disso, no processo de planejamento urbano, tal assunto é tratado de forma não adequada, pois desconsideram os efeitos da organização da cidade no processo de emissão de poluentes, em especial quanto à contribuição dos veículos *flex*, que são, atualmente, os mais presentes na frota nacional. Associado a isso, há poucos estudos que avaliam a forma como o consumo e as emissões se relacionam com os diferentes tipos de vias urbanas.

Sob essa perspectiva, percebe-se uma necessidade de se conhecer o comportamento de consumo e emissão dos veículos *flex fuel*, relacionado a vias de funcionalidades distintas, como forma de se desenvolver mais uma ferramenta que auxilie o planejamento urbano.

1.2 Questões Motivadoras

As questões que motivaram o desenvolvimento deste trabalho são:

- a) O adensamento urbano influencia no perfil de consumo de combustível e emissão de poluentes?

- b) O padrão de uso do solo impacta no perfil de consumo e emissão?
- c) A flutuação do volume de tráfego ao longo do dia afeta o perfil de consumo e emissão?

1.3 Justificativa

Os veículos *flex fuel* ocupam grande parcela do mercado nacional (DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO, 2016), evidenciando sua crescente representatividade no tráfego urbano. Ainda não há dados, na cidade, sobre o comportamento desses veículos quando associados a diferentes classificações de vias, o que limita a perspectiva quando do desenvolvimento de soluções para o planejamento urbano.

Além disso, uma das ênfases do planejamento urbano é a manutenção da qualidade do ar. Desta forma, determinar os perfis de consumo de combustível e emissão de poluentes para esse tipo de veículo e avaliar seu comportamento em vias de funcionalidades diferentes, associadas a padrões de uso do solo e adensamento urbano, poderá contribuir para verificar o impacto das vias no consumo e emissão e, assim, fornecer parâmetros que auxiliem não só na calibração de modelos, mas como no planejamento urbano como um todo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a relação existente entre consumo de combustível e emissão de poluentes de veículos *flex fuel* em vias urbanas com diferentes classificações funcionais.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Analisar o impacto do adensamento urbano no perfil de consumo e emissão;
- b) Verificar a influência do padrão de uso do solo sobre o perfil de consumo e emissão da via;
- c) Verificar se a flutuação do volume de tráfego ao longo do dia influencia no consumo e emissão.

2 EMISSÕES VEICULARES

Os veículos automotores são movidos por processos de combustão e emitem poluentes atmosféricos diversos, a depender do combustível utilizado. O ambiente urbano apresenta características próprias de emissão de poluentes, e afetam diretamente a saúde humana e o meio ambiente. Assim, faz-se essencial o direcionamento de esforços para compreensão e amenização desse problema.

2.1 Poluentes atmosféricos

O meio ambiente é formado por diversos componentes, em variadas concentrações. Quando esses compostos extrapolam suas concentrações usuais e/ou afetam negativamente a saúde ou o meio, eles passam a ser considerados poluentes, que podem ser classificados como primários ou secundários.

Os primários são aqueles liberados diretamente pela fonte emissora e afetam o meio diretamente, como o monóxido de carbono (CO), um dos resultados da combustão. Os secundários são produtos que surgem da reação química entre outros compostos, geralmente também poluentes, e passam a afetar o meio, como o ácido sulfúrico (H₂SO₄), formado a partir de reações entre dióxido de enxofre (SO₂) e água (H₂O) e que forma a chuva ácida.

Alguns desses compostos agem na atmosfera terrestre e, assim, são chamados de poluentes atmosféricos. A atmosfera é um meio bastante dinâmico, composta por, aproximadamente, 75% de nitrogênio, 20% de oxigênio e 5% de outros componentes. Ela é formada por diversas camadas, entre elas, a troposfera e a estratosfera (VALLERO, 2008).

A troposfera é a camada mais próxima à superfície terrestre e estende-se a uma espessura entre 7 km e 17 km, a depender da latitude. Desta forma, esta é a camada primordialmente afetada por eventos climáticos e pela ação dos poluentes atmosféricos. A estratosfera é a camada imediatamente acima da troposfera, estendendo-se a altitudes entre 7 km e 50 km. É na troposfera onde se encontra a camada de ozônio.

A avaliação dos impactos ambientais de veículos, geralmente, é realizada através da análise de emissões produzidas devido à combustão do combustível, completa ou incompleta. A primeira ocorre quando existe oxigênio suficiente para consumir todo o combustível disponível, gerando dióxido de carbono (CO₂), vapor de água (H₂O) e energia, sendo esse tipo de combustão ideal, pois apresenta maior aproveitamento energético. Quando isso não acontece, ocorre a combustão incompleta e geram-se resíduos, como o monóxido de

carbono (CO), os óxidos de nitrogênio (NO_x), os óxidos de enxofre (SO_x), os aldeídos (RCHO), o Material Particulado (MP) e os hidrocarbonetos (HC) (JIMÉNEZ-PALACIOS, 1999; GRIESHOP *et al.*, 2012; CASSIANO, 2016).

Segundo o ITF, 23% das emissões mundiais de CO₂ e 15% dos gases do efeito estufa são oriundos do setor de transportes (INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM, 2010). De acordo a Organização Mundial de Meteorologia (OMM), o CO₂ encontra-se normalmente na atmosfera a concentrações de 400 ppm, porém, nos últimos anos, esse número tem se elevado rapidamente, superando a concentração usual pela primeira vez em 2014, atingindo 408 ppm, com previsão de superar 410 ppm em 2017 (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE METEOROLOGIA, 2017). Dos produtos gerados pela combustão, os mais agressivos para a intensificação do efeito estufa e para o detrimento da saúde populacional são CO₂, CO, NO_x, SO_x, RCHO, MP e HC (BOSCH, 2005; FREITAS; SOLCI, 2009; BILLIONNET; SHERRILL e ANNESI-MAESANO, 2012; ZHANG *et al.*, 2013; VALLERO, 2014).

O CO₂ é um dos responsáveis pelo efeito estufa, por ser capaz de absorver comprimentos de onda infravermelho, além de participar na formação de chuva ácida. Sua emissão veicular é proporcional ao consumo de combustível e é um dos principais produtos da combustão (CARVALHO JR; LACAVA, 2003; BOSCH, 2005; YANG; OMAYE, 2009). O CO₂ pode causar asma e bronquite, aumento das crises de asma e dor precordial (desconforto torácico), limitação funcional e doenças cardiovasculares (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2017).

A presença de CO nas emissões é um sinal de queima rica, onde há a presença de mais combustível que oxigênio (FERGUSON; KIRKPATRICK; 2001; BOSCH, 2005). Ele é caracterizado por ser um gás incolor, inodoro, insípido e solúvel em água (BOSCH, 2005; LOUREIRO, 2005; YANG; OMAYE, 2009). A exposição a esse componente apresenta diversas consequências, que podem ser apenas uma dor de cabeça leve, quando em exposição à concentração de 200 ppm por três horas; perda de consciência, quando a uma concentração entre 2000 e 2500 ppm por trinta minutos; e óbito, quando ocorre exposição a concentrações superiores a 4000 ppm em menos de trinta minutos (CARVALHO JR; LACAVA, 2003).

Os óxidos de nitrogênio (NO_x) são produzidos através da interação entre o nitrogênio e o oxigênio atmosféricos a altas temperaturas, situação encontrada durante a combustão. Existem várias combinações possíveis, dentre as quais as principais são o óxido nítrico (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO₂), sendo o último o mais agressivo ao ambiente (CARVALHO JR; LACAVA, 2003; MARTINS, 2005; YANG; OMAYE, 2009). A produção

de NO_x é maior na utilização do diesel, pois os motores a compressão atingem temperaturas mais elevadas. Para os motores a gasolina, a produção de NO é maior nas zonas de mistura rica (mais combustível), e nas zonas de mistura pobre (mais oxigênio), a maior produção é de NO_2 (MARTINS, 2005).

Os NO_x apresentam alta toxicidade e participam de reações com radicais livres na atmosfera, tornando-os nocivos à saúde e ao meio ambiente (BLONDEAU *et al.*, 2005). O NO_2 é um gás altamente tóxico e irritante, que possui um odor característico, e pode ocasionar ardência nos olhos e mucosas, além de atingir o sistema respiratório. Em casos mais graves, a inalação do gás pode causar hemorragia, insuficiência respiratória e levar ao óbito. Além disso, o NO_2 participa da formação de chuva ácida e do *smog* fotoquímico, uma neblina contaminada por fumaças (YANG; OMAYE, 2009; MARTIN *et al.*, 2016; FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER, 2017). O NO é um gás incolor que realiza reações na atmosfera com oxigênio (O_2), ozônio (O_3) e radicais peróxidos, contribuindo para a destruição da camada de ozônio, juntamente com o NO_2 (YANG; OMAYE, 2009; E-CYCLE, 2017).

Os SO_x , formados pelo dióxido de enxofre (SO_2) e trióxido de enxofre (SO_3), são resultado da combustão do enxofre presente nos combustíveis de origem fóssil, principalmente o diesel. Em relação à saúde humana, os óxidos de enxofre podem causar irritação nos olhos, problemas cardiovasculares, respiratórios e morte. Adicionalmente, o SO_2 também é um dos responsáveis pela ocorrência de chuva ácida, junto com o NO_2 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2006; YANG; OMAYE, 2009; DRUMM *et al.*, 2014; FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER, 2017).

O RCHO é um produto característico gerado na combustão do ciclo Otto, em especial durante a utilização de etanol, e no ciclo Diesel (ABRANTES; ASSUNÇÃO; HIRAIÁ, 2005). Composto especialmente por formaldeído e acetaldeído, é produzido a partir da reação de oxidação parcial dos álcoois ou de reações fotoquímicas na atmosfera. Os principais efeitos na saúde humana são a irritação de mucosas, olhos, nariz e vias respiratórias em geral, podendo causar crises asmáticas, além de terem potencial carcinogênico. Além disso, o RCHO é um dos responsáveis pela formação de O_3 , que, a nível troposférico, é considerado poluente (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2017).

O MP é resultado da combustão incompleta dos combustíveis, produzido em maior proporção em motores a diesel, sendo pouco expressivo em motores a gasolina. Sua composição é formada por partículas de carbono, com grande superfície específica,

facilitando a adesão de hidrocarbonetos queimados ou parcialmente queimados (DAMM *et al.*, 2002; MARTINS, 2005; WANG *et al.*, 2014; FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER, 2017). Ele é classificado de acordo com seu diâmetro aerodinâmico médio, e o material fino (diâmetro inferior a 2,5 µm) causa maiores preocupações, pois é respirável e atua nas vias respiratórias inferiores (alvéolos), havendo pouca eficiência na sua remoção. As partículas maiores, entretanto, podem se acumular nas vias respiratórias superiores, complicando quadros de asma e doenças cardiovasculares (QUEIROZ *et al.*, 2007). Além disso, o MP pode causar danos à vegetação, redução da visibilidade e contaminação do solo (FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER, 2017).

Os HC também são resultado da combustão incompleta, originados do óleo do motor ou na fuga de combustível pela alta pressão. São formados por hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, dentre outros componentes, classificados em metano (NH₄) e hidrocarbonetos não metano (NMHC). A soma de NH₄ e NMHC forma os hidrocarbonetos totais (THC). Durante a saída dos gases pelo escapamento, ocorre a oxidação lenta de parte dos HC, devido às baixas temperaturas (MARTINS, 2005; KAMPA; CASTANAS, 2008; BILLIONNET; SHERRILL e ANNESI-MAESANO, 2012). Os HC são um dos responsáveis pela formação de ozônio troposférico, tóxico para seres vivos, e pela intensificação do efeito estufa (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2017). A inalação dos HC pode causar anemia, náuseas, vômito, distúrbios de consciência, convulsões, letargia e câncer (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 1998).

O Quadro 1 apresenta um resumo dos efeitos dos poluentes veiculares atmosféricos na saúde e no meio ambiente, baseado nas referências citadas ao longo deste item.

Quadro 1 – Efeitos dos poluentes atmosféricos na saúde e no meio ambiente

Poluente	Efeitos na saúde	Efeitos no meio ambiente
CO ₂	Asma e bronquite, aumento das crises de asma e dor precordial (desconforto torácico), limitação funcional, doenças cardiovasculares.	Poluição do ar, chuva ácida, intensificação do efeito estufa.
CO	Dor de cabeça leve, perda de consciência e, quando em altas concentrações, óbito.	-
NO _x	Ardência nos olhos e mucosas, além de atingir o sistema respiratório. Em casos mais graves, a inalação do gás pode causar hemorragia, insuficiência respiratório e levar ao óbito.	Formação de chuva ácida e <i>smog</i> fotoquímico, e destruição da camada de ozônio.
SO _x	Irritação nos olhos, problemas cardiovasculares, respiratórios e óbito.	Formação de chuva ácida.

Poluente	Efeitos na saúde	Efeitos no meio ambiente
MP	Acúmulo nas vias respiratórias, e complicação de quadros de asma e doenças cardiovasculares.	Danos a vegetação, redução da visibilidade e contaminação do solo.
HC	Anemia, náuseas, vômito, distúrbios de consciência, convulsões, letargia e câncer.	Formação do ozônio troposférico e intensificação do efeito estufa.

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Os poluentes podem afetar o meio em diversas escalas: local, a partir de grandes emissores ou vários pequenos emissores, em especial de CO, que podem causar alterações de odor e formação de nebulosidade; urbano, a partir da concentração de poluentes primários (emitidos diretamente pela fonte) e secundários (formados a partir de reações químicas de outros poluentes), com efeitos em uma área maior, gerados especialmente por veículos; regional, como a formação de chuvas ácidas e redução de visibilidade que afetam, principalmente, centros urbanos muito próximos; e global, como a intensificação do efeito estufa e alterações climáticas (VALLERO, 2008).

Há uma diferença nos níveis e efeitos dos poluentes veiculares ao se considerar um transporte regional, ou um transporte urbano. Em termos de impacto imediato para a sociedade, os efeitos ocasionados em uma área urbana tendem a ser mais representativos em termos de saúde pública, dada a maior concentração populacional, bem como a maior quantidade de veículos e deslocamentos ao longo do dia. Desta forma, destinar atenção para tal problema torna-se relevante.

2.2 Emissões veiculares em áreas urbanas

Nos últimos anos, os impactos oriundos do setor de transportes têm sido um campo fértil para pesquisa. Diversos estudos procuraram calcular estimativas de emissão mais refinadas, considerando usuário e viagem, contemplando características do veículo e padrão de deslocamento (ANDERSON *et al.*, 1996; KO *et al.*, 2011; CARVALHO, 2014). Eles buscaram, também, realizar análises de dispersão baseadas em emissões associadas a diversos fatores, como velocidade, hora do dia, estação do ano e zona da cidade (CAVALCANTE *et al.*, 2006; HATZOPOULOU; MILLER, 2010; INT PANIS *et al.*, 2011; SOUSA *et al.*, 2015; ROCHA *et al.*, 2016; CAVALCANTE *et al.*, 2017), encontrando correlação entre esses indicadores e crescimento das concentrações dos poluentes, resultando no aumento de riscos à saúde.

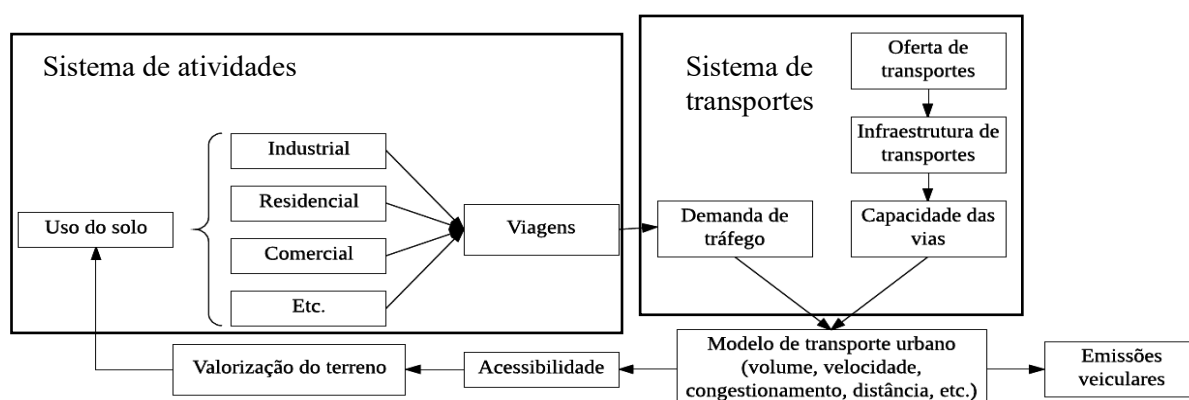
Diversos autores propuseram a associação entre as emissões veiculares com fatores socioeconômicos (KAHN, 1998; KO *et al.*, 2011; SIDER *et al.*, 2013). Foi observado que bairros com maior poder econômico tendem a ter elevados fatores de emissão de poluentes por possuírem e utilizarem mais veículos. Por sua vez, bairros de menor poder econômico e maior vulnerabilidade social também apresentam elevados fatores de emissão por utilizarem veículos mais antigos e poluidores.

Alguns estudos apresentaram correlação entre salário, localização da residência e emissões. Além disso, fatores como gênero, idade e propriedade veicular também revelaram ter grande influência sobre as emissões (BRAND; PRESTON, 2010; BARLA; MIRANDA-MORENO; LEE-GOSSELIN, 2011; KO *et al.*, 2011).

A relação existente entre padrão de uso do solo e emissão veicular por residência foi abordada por pesquisadores, e foi encontrado que densidade habitacional, densidade comercial e número de interseções são inversamente proporcionais às emissões residenciais, e que distância de viagem apresentou uma influência positiva (FRANK; STONE; BACHMAN, 2000; HONG; SHEN, 2013; HONG; GOODCHILD, 2014).

A Figura 1 representa a relação entre o veículo e o sistema de transportes.

Figura 1 – Ciclo causal entre uso do solo e transportes



Fonte: Adaptado de Zhang, Matsushima e Kobayashi (2017).

Como pode ser visto, há uma relação intrínseca entre o sistema de atividades, que contém os motivos de deslocamentos, e o sistema de transportes, que dá suporte e organiza o tráfego. A demanda é criada a partir das necessidades de locomoção dos usuários, por variados motivos (trabalho, escola, lazer, etc.). A oferta dos sistemas de transportes é composta pela infraestrutura da rede de transportes, vias, veículos, etc. Com isso, tem-se as características de fluxo de uma região, como volume, velocidades, capacidade da via e frota, que estão diretamente relacionadas ao consumo de combustível e às emissões veiculares, além

de afetarem a acessibilidade da população. Com o aumento da facilidade de acesso, há valorização do entorno e, com isso, ocorre um favorecimento do aumento do tráfego na região. Assim, reinicia-se o ciclo.

Hong e Shen (2013), utilizando o programa *MOtor Vehicle Emission Simulator* (MOVES) para estimativa de fatores de emissão na região de Puget Sound, Washington, Estados Unidos da América (EUA), e baseados nas características do veículo e da viagem, conjuntamente a um modelo multinível bayesiano, obtiveram resultados que indicam relação entre emissões e densidade residencial, influenciadas por correlação espacial e auto seleção. Entretanto, os resultados ainda mostram uma redução significativa nas emissões quando se aumenta a densidade residencial (HONG; SHEN, 2013).

Hong e Goodchild (2014) também utilizaram o MOVES, além de informações sociodemográficas da região de Puget Sound, Washington, EUA, e dados de velocidade média, tipo de via e características dos veículos da frota, considerando um modelo multinível, e estimaram a emissão de CO₂ em áreas urbanas e do subúrbio. Além disso, eles consideraram fatores como densidade habitacional, número de interseções e entropia, e dividiram a região em diversas zonas de tráfego, que supõe uma similaridade de comportamento dos usuários em cada zona. Eles descobriram que, em áreas urbanas, locais com maior densidade habitacional, entropia e número de interseções tendem a gerar uma redução nas emissões por residência, com densidade habitacional tendo maior impacto. Isso ocorreu porque áreas mais adensadas apresentaram melhor acessibilidade e redução de distâncias de viagem, reduzindo as consequentes emissões (HONG; GOODCHILD, 2014).

Sider *et al.* (2013) também constataram relação entre padrão de uso do solo e emissão de poluentes, em especial o NO_x, na cidade de Montreal, Canadá. Eles encontraram, com auxílio de simuladores, utilizando matrizes de origem e destino, que as regiões mais centrais, onde há uma concentração de atividades comerciais, abrigam a maior parte das emissões, apesar de uma menor taxa *per capita*. Em contrapartida, as regiões mais periféricas apresentam maiores taxas de emissão por habitante (SIDER *et al.*, 2013).

É conhecido que as características da via influenciam em seu tráfego, micro e/ou macroscopicamente. Geometria, velocidade máxima e presença de semáforos ou interseções são alguns fatores dessa relação que afetam o consumo de combustível e a emissão de poluentes, e que são determinados durante o processo de planejamento urbano (ARIOTTI, 2010).

Um estudo realizado por Zhang, Matsushima e Kobayashi (2017), em Changzou, China, evidenciou que existem alterações significativas nas emissões quando em vias de

diferentes classificações funcionais. Os autores relacionaram uso do solo às informações da malha viária e da matriz origem-destino da região e, com auxílio de simuladores, determinaram as vias coletoras e arteriais como as mais expressivas emissores, representando, juntas, cerca de 88% das emissões (ZHANG; MATSUSHIMA; KOBAYASHI, 2017).

No Brasil, o Código Brasileiro de Trânsito (CBT) classifica as vias em urbanas e rurais, sendo as urbanas subdivididas em quatro tipos, como descritos a seguir:

- a) Trânsito rápido: também chamada de expressa, onde o trânsito é livre, sem acesso a lotes lindeiros, sem travessia de pedestres ou interseções em nível, com velocidade máxima de 80 km/h;
- b) Arterial: também conhecida como principal, garantem o elo entre diferentes bairros, há a presença de interseções em nível auxiliada por semáforos, e acesso a lotes lindeiros, vias secundárias e locais, com velocidade máxima de 60 km/h;
- c) Coletora: também conhecida por secundária, funciona como acesso a vias arteriais e de trânsito rápido, coletando e distribuindo o trânsito, de forma a facilitar o deslocamento, com velocidade máxima de 40 km/h;
- d) Local: onde há a presença de interseções em nível não semaforizadas, geralmente reservadas a acessos locais e áreas restritas, com velocidade máxima de 30 km/h.

A classificação viária de Fortaleza-CE é determinada segundo a Lei de Uso e Ocupação do Solo (LUOS) n 7.897, de 1996, atualizada em 2010 (FORTALEZA, 2015). Vale ressaltar que esta classificação inclui a categoria trânsito rápido, entretanto, especialistas e profissionais da área questionam a existência desse tipo de via na cidade, pois as vias que recebem tal classificação apresentam acesso a lotes lindeiros, travessia de pedestres ou interseções em nível.

Alguns programas, como o MOVES, utilizam a classificação das vias como parâmetro para estimativa de consumo de combustível e emissão de poluentes (ARIOTTI, 2010). Entretanto, esses valores são baseados nos perfis de consumo e emissão de outros países. Além disso, geralmente, eles são obtidos através de ensaios de laboratório (dinamômetro) ou sensores remotos, que não representam a realidade das condições em campo, como atestado por diversos estudos (ESTEVEZ-BOOTH *et al.*, 2001; SAMUEL; AUSTIN e MORREY, 2002; ACHOUR; CARTON e OLABI, 2011; TIETGE *et al.*, 2017).

Em 2001, Esteves-Booth *et al.* utilizaram equipamentos embarcados (OBD, do inglês *on-board diagnostic*) em um veículo para monitoramento em tempo real das condições de tráfego nas vias de Edimburgo, Escócia. Os resultados obtidos foram utilizados para elaboração de um ciclo de condução específico da cidade, de modo a se adequar à legislação de controle de poluição do ar, e comparados ao ciclo de condução europeu à época. Eles concluíram que, para melhor representação do tráfego da cidade, o ciclo de condução europeu deveria sofrer algumas alterações, como a consideração de eventos de aceleração e desaceleração mais frequentes (ESTEVEES-BOOTH *et al.*, 2001).

Achour, Carton e Olabi (2011) realizaram um estudo com equipamento OBD na cidade de Dublin, Irlanda, de modo a verificar se o ciclo de condução europeu correspondia às condições de emissão na cidade e o resultado mostrou que, para atender às condições reais, o ciclo de condução deveria passar por algumas modificações, pois este superestimava as emissões de CO e subestimava as de NO_x. Desta forma, concluíram que cada região deveria ter seu próprio ciclo de condução baseado em testes em campo, para melhor representar as características únicas de tráfego e emissão (ACHOR; CARTON; OLABI, 2011).

Samuel, Austin e Morrey (2002) avaliaram os ciclos de condução americano e europeu em vigor na época e que estavam sendo propostos. Eles concluíram que, de maneira geral, as emissões são consideravelmente subestimadas, levando a uma conclusão equivocada do impacto dos veículos, pois os ciclos pré-definidos não consideravam as variações de velocidade e aceleração no meio urbano; devendo cada região obter seu próprio ciclo de condução (SAMUEL; AUSTIN e MORREY, 2002).

Não obstante, a flutuação do volume de tráfego ao longo do dia é um dos responsáveis pela variação de consumo de combustível e dos fatores de emissão. Eles podem ser estimados através de modelos de emissão estáticos que utilizam hora do dia, dia da semana, período do ano e conexões de trajeto para as simulações (ARIOTTI, 2010; LINDHJEM *et al.*, 2012).

Lindhjem *et al.* (2012) simularam as emissões nas cidades de Detroit e Atlanta, EUA, através do MOVES, avaliando a contribuição de diferentes tipos de veículos. Eles encontraram picos de emissão significativos durante o dia, com grandes variações, em especial nas horas de maiores fluxos, quando as pessoas vão e voltam do trabalho. Além disso, foi verificado que há reduções na emissão durante o fim de semana e nos meses de férias, como julho. Eles expressaram a relevância de se monitorar as emissões ao longo do dia, da semana e do ano, de modo a obter dados que melhor representem o perfil de emissão, e a contribuição de diferentes tipos de combustíveis (LINDHJEM *et al.*, 2012).

Em geral, os estudos que levam em consideração a influência do tipo de via utilizam-se dos programas anteriormente mencionados em simulações de tráfego, utilizando dados locais para calibração dos modelos.

3 QUANTIFICAÇÃO E MONITORAMENTO DE EMISSÕES VEICULARES

Para realizar a avaliação dos impactos das emissões veiculares, é necessário fazer a quantificação dos diferentes poluentes emitidos, através de coleta dessas informações, direta ou indiretamente, dos veículos de interesse. No Brasil, os veículos com tecnologia *flex fuel* vem obtendo grande notoriedade, juntamente com espaço no mercado. Dessa forma, é preciso implementar um sistema de monitoramento e controle dessas emissões, de modo a cumprir os valores estabelecidos por lei.

3.1 Métodos de coleta de emissões veiculares

Para se obter os níveis de emissão de um veículo, existem, basicamente, três métodos: testes em bancada (dinamômetro); sensoriamento remoto; e testes com instrumento embarcado (*on-board*) (CASSIANO, 2016).

No teste com dinamômetro, o ensaio é realizado em um ambiente controlado, de laboratório, e as medidas são obtidas a partir de ciclos de condução convencionais. Isso permite que os resultados sejam reprodutíveis e comparáveis, uma vez que não existem influências externas durante o procedimento, como tráfego. Entretanto, uma crítica a esse método é que ele não representa as condições reais de emissão, dada a sua condução controlada (FREY *et al.*, 2003; FRANCO *et al.*, 2013; FRANCO *et al.*, 2014; FONTARAS; ZACHAROF; CIUFFO, 2017; TIETGE *et al.*, 2017).

Outra consideração é quanto à coleta dos gases, que ocorre de maneira contínua ao longo do escapamento e recolhe as emissões em um diluidor para que sejam adequadas às concentrações normalmente encontradas em campo (BOSCH, 2005). A diluição dos gases ocorre em uma proporção que pode variar entre 1:5 e 1:10, com um sistema de bombas que garante que o fluxo volumétrico formado pelos gases do escapamento e pelo ar seja constante. Assim, coletam-se amostras em sacos (*bags*) para subsequente análise da concentração de cada componente. A crítica quanto a esse método de coleta dos gases é em relação à agregação dos dados, que fornece resultados de concentração totais e impossibilita a obtenção de emissões instantâneas (BOSCH, 2005; GRIESHOP *et al.*, 2012; LI; CHEN; YAN, 2013; FRANCO *et al.*, 2013; PANG; FUENTES e RIEGER, 2014; CASSIANO, 2016).

O método do sensoriamento remoto ocorre com o auxílio de ondas de infravermelho (IV) e, em alguns casos, espectrometria em ultravioleta (UV), e mede a proporção dos poluentes nos gases de escapamento. Suas maiores vantagens são o fato de ele

não estar conectado ao veículo e permitir a leitura de um grande número de veículos por dia, em campo, a um custo relativamente baixo. Entretanto, ele está condicionado às condições meteorológicas e fornece apenas uma estimativa instantânea para um local específico, não sendo muito eficiente próximo a interseções ou em vias de múltiplas faixas (FREY *et al.*, 2003; CARSLAW; RHYS-TYLER, 2013). O sensoriamento remoto vem sendo bastante utilizado em monitoramento de frotas veiculares, e para abastecimento de bancos de dados com informações relativas a fatores de emissão (ZHOU *et al.*, 2014).

O último método, com instrumento *on-board*, segue em contrapartida aos dois métodos anteriormente citados por permitir a coleta de informações em tempo real de um veículo na via, possibilitando a análise de emissões sob qualquer condição de condução. Esse dispositivo, também chamado de sistema portátil de medição de emissões, do inglês *Portable Emission Measurement System* (PEMS), é formado por um analisador de gases, um aparelho de diagnóstico a bordo dos parâmetros mecânicos do veículo ou *On-Board Diagnostic* (OBD), um sistema global de localização (GPS) e controladores de fluxo. Ele permite a obtenção de dados de alta precisão a uma frequência de 1 Hz, garantindo a instantaneidade das informações. (FREY *et al.* 2003; WEISS *et al.*, 2011; KOUSOULIDOU *et al.*, 2013; CASSIANO, 2016).

Inicialmente, seu uso não era muito difundido, pois apresentava alto custo inicial. Ademais, a aplicação destes equipamentos implicava na obtenção de poucos parâmetros, e para uma frota pequena. Entretanto, com o desenvolvimento tecnológico, seu custo diminuiu e esse método tornou-se mais aplicável (FREY *et al.*, 2003; FRANCO *et al.*, 2013).

3.2 Legislação

Com o desenvolvimento da sociedade nas diversas áreas, criou-se uma maior necessidade de deslocamentos e, conseqüentemente, aumento na utilização e no número de veículos. Gradualmente, observou-se uma redução da qualidade do ar, atingindo a saúde humana em diversos aspectos, como a intensificação de doenças cardiorrespiratórias, alergias e câncer; e o meio ambiente, com a destruição de ecossistemas, alterações climáticas, surgimento de chuvas ácidas, etc. (CAVALCANTE *et al.*, 2017).

Constatou-se que uma grande parte da contribuição da poluição do ar é oriunda do escapamento dos veículos, tornando-os notáveis responsáveis por esse problema (INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM, 2010; ACHOUR; CARTON; OLABI, 2011; AYYILDIZ *et al.*, 2017). Desta forma, alguns países criaram regulamentações de modo a

reduzir as emissões de poluentes e melhorar a qualidade do ar, com destaque para os Estados Unidos, União Europeia e Japão.

Os Estados Unidos, um dos países pioneiros na criação de legislações de controle da qualidade do ar, teve sua primeira lei aprovada em relação a esse assunto em 1948, quando uma nuvem de poluentes atingiu Donora, no estado de Pensilvânia, causando vinte mortes e atingindo mais de seis mil pessoas. Com os anos, os limites de emissão se tornaram mais restritivos, com o controle de CO, NO₂, HC, material particulado de tamanho aerodinâmico médio menor que 10 µm (MP10) e ozônio (O₃), sendo regulados hoje pelo Ato do Ar Limpo, do inglês *Clear Air Act* (CAA), implementado diretamente pela agência de proteção ambiental americana (EPA), ou por legislações específicas locais, estaduais ou de tribos indígenas (KUKLINSKA; WOLSKA e NAMIESNIK, 2015; CASSIANO, 2016; ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2017).

A União Europeia (EU) é, também, uma das referências mundiais em legislações ambientais, em especial as relacionadas à qualidade do ar, tendo seu início no Reino Unido, em 1906, e expandindo-se ao continente nos anos subsequentes. Em 1979, foi assinada a primeira lei de controle de emissão de poluentes que valia para todos os países da EU, a Convenção sobre a Poluição Atmosférica Transfronteiriça a Longa Distância, que regulava as emissões de SO₂, NO_x, amônia (NH₃), compostos voláteis orgânicos (VOC's), metais pesados, poluentes orgânicos persistentes (POP's) e MP. Hoje, as regulações encontram-se nas normas EURO de controle de emissão, estando em vigência a Euro 6/WE 715/2007 (MARCO; BO, 2013; KUKLINSKA; WOLSKA e NAMIESNIK, 2015).

No Japão, as primeiras regulações em termos de poluição atmosférica surgiram na década de 1970, tendo o país enfrentado um série de problemas ambientais durante seu desenvolvimento econômico nas décadas de 1950 e 1960. Suas leis permitiram reduzir consideravelmente os níveis de poluição através de altos padrões de tecnologias ambientais e sistemas de regulação, associadas a políticas de energia (FAIZ; WEAVER e WALSH, 1996; KANADA *et al.*, 2013; CASSIANO, 2016). As normas japonesas, decretadas pelo Ministério do Meio Ambiente e de competência das leis de Controle de Poluição do Ar, foram reformadas três vezes desde 2000. A primeira vez em 2000-2002, alterando os padrões de curto prazo; a segunda vez em 2005-2007, alterando os critérios a longo prazo; e em 2009-2010, estabelecendo novos padrões de longo prazo, sendo esses similares às normas da Euro 6/WE 715/2007 (FAIZ; WEAVER e WALSH, 1996; TRANSPORT POLICY, 2015).

Seguindo influência externa, o Brasil também começou a desenvolver políticas públicas de controle de poluição e manutenção da qualidade do ar na década de 1970. Em

especial, devido à condição preocupante da cidade de São Paulo, confirmada por estudos realizados pelo setor de saúde pública (VASCONCELLOS, 2013). Baseando-se, principalmente, nas legislações americana e europeia, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) criou o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), por meio da Resolução CONAMA nº 18/1986 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986).

O PROCONVE exige controle estatístico durante a produção dos veículos, e homologação de protótipos, obrigando a implementação de tecnologias em veículos novos que garantam um baixo potencial poluidor e uma reduzida taxa de deterioramento das emissões ao longo do seu tempo de utilização. O programa também classifica os veículos de acordo com seu Peso Bruto Total (PBT), e é dividido em veículos leves (fases L) e em veículos pesados (fases P), cujas fases são estipuladas em períodos diferentes (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986).

Para os veículos leves, foram elaboradas seis fases. Atualmente, o programa encontra-se na fase L6, que abrange todos os veículos produzidos a partir de 2013, e determina os limites de emissão de poluentes de veículos leves de passageiro e leves comerciais, tanto para motores de ciclo Otto quanto Diesel (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986). A Tabela 1 apresenta as fases do programa, bem como seu equivalente europeu e ano de implementação.

Tabela 1 – Fases do PROCONVE

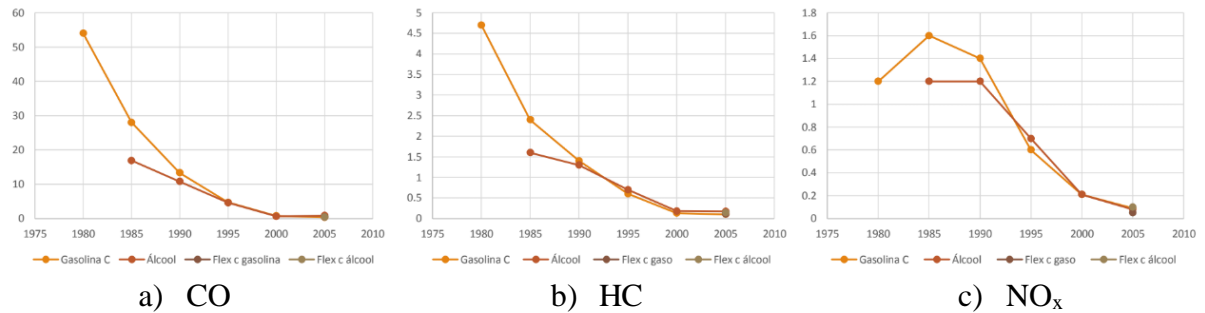
Fase PROCONVE	Norma Europeia Equivalente	Data de implementação
L1	–	1988
L2	–	1992
L3 (CONAMA nº 8/93)	Euro 0/2	1997
L4 (CONAMA nº 315/2002)	Euro 3	2005 (40%) 2006 (70%) 2007 (100%)
L5 (CONAMA nº 315/2002)	Euro 4	2009
L6 (CONAMA nº 415/2009)	Euro 5	2013 (Diesel) 2014 (Gasolina) 2015 (Todos os tipos)

Fonte: Adaptado de TransportPolicy (2017).

Assim como nas legislações internacionais, os limites de emissão máximos são definidos pelo tipo de veículo e foram gradualmente se tornando mais rigorosos, exigindo que novas tecnologias fossem implementadas e que os novos veículos estivessem em

conformidade com testes padronizados (dinamômetro) e combustíveis certificados (VASCONCELLOS, 2013; CASSIANO, 2016; WANG *et al.*, 2016). A Figura 2 apresenta como esses limites foram alterados ao longo dos anos para alguns poluentes, a depender do tipo de combustível utilizado. Ressalta-se que o CO₂ não é abrangido pela legislação.

Figura 2 – Limites de emissão para veículos novos leves ao longo dos anos em g/km



Fonte: Adaptado de Vasconcellos (2013).

A maneira como os dados são coletados dependem da tecnologia do veículo em análise. Nas áreas urbanas brasileiras, desde o início dos anos 2000, os veículos *flex fuel* têm ganho notoriedade em termos de quantidade disponível na frota em circulação nos grandes centros urbanos. Este tipo de veículo tem a possibilidade de utilizar duas fontes distintas de energia, resultando então em padrões distintos de emissão para o mesmo veículo.

4 VEÍCULOS *FLEX FUEL*

O Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL) surgiu em meio à crise do petróleo da década de 1970, quando o preço do barril aumentou cerca de 300% dentro de cinco meses, em virtude da situação geopolítica mundial na época, e os gastos com importação desse insumo aumentaram em quatro vezes. No período, o Brasil era responsável por apenas 20% da quantidade consumida, o que afetou fortemente a indústria do país (UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR, 2017). Segundo o Decreto nº 76.593, o programa foi criado para estimular a produção de etanol e, em especial, desenvolver técnicas que permitissem a sua utilização como combustível veicular, de modo a diminuir a dependência do petróleo.

Na primeira fase do PROÁLCOOL, buscou-se incluir o etanol anidro na gasolina, em substituição ao chumbo tetraetila, um aditivo importado e com elevado potencial poluidor. Já no fim da década de 1970, com a segunda crise do petróleo, surgiram os primeiros veículos que utilizavam o álcool hidratado como combustível exclusivo. O governo promoveu diversas ações de estímulo de consumo desses veículos, como a redução do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) e a estipulação do preço do etanol em 64,5% do preço da gasolina. Assim, eles se tornaram populares, e logo tornaram-se expressivos no mercado nacional, representando 96% das vendas em 1985 (BIODIESELBR, 2006; UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR, 2017).

Ao longo das décadas de 1980 e 1990, porém, o preço do barril de petróleo sofreu uma brusca queda. Além disso, houve uma crise interna no setor da agroindústria, diminuindo a produção de álcool (BIODIESELBR, 2006). Isso fez com que a vantagem econômica do álcool em relação à gasolina diminuísse, e esse segundo voltasse com prioridade na produção e nas vendas de automóveis (MOTTA; FERREIRA, 1988; FRANCISCO, 2017).

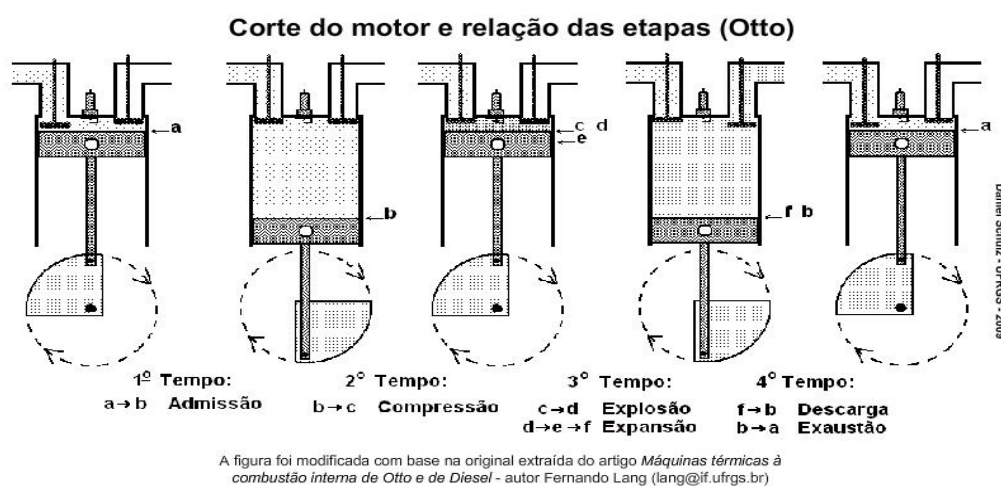
Entretanto, mais uma vez, o cenário internacional muda e, no início do século XXI, uma nova crise do petróleo reforçou a necessidade de encontrar um insumo substituto mais barato, estável e renovável, não apenas pela sua inconstância no mercado, mas, também, como um meio de se reduzir o impacto ambiental gerado pela sua utilização (FRANCISCO, 2017).

Desde a década de 1980, a Bosch tentava desenvolver um sistema automotor que permitisse a utilização concomitante dos dois combustíveis em diferentes proporções, chegando a lançar um protótipo em 1994, porém, não havia estímulo comercial suficiente para a comercialização em escala do veículo. Em 1999, surgiu a tecnologia *flex fuel* (SFS –

Software Flex fuel Sensor), desenvolvida pela empresa Magneti Marelli, que utilizava um programa computacional aliado ao módulo de injeção eletrônica, possibilitando o uso simultâneo de etanol e gasolina, sem perdas de potência ou aumento das emissões de gases poluentes (ALVES; BRANDAO, 2007). Entretanto, apenas em 2003 os veículos de tecnologia *flex* entraram no mercado e rapidamente dominaram o cenário nacional, sendo hoje o de maior representatividade, sendo cerca de 35% da frota circulante (DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO, 2016).

Os motores dos veículos *flex fuel* são do tipo combustão interna, ou ignição comandada, e funcionam de acordo com o ciclo Otto da termodinâmica. O ciclo Otto é de quatro tempos: admissão, compressão, expansão e escape (liberação) (MARTINS, 2005), conforme Figura 3.

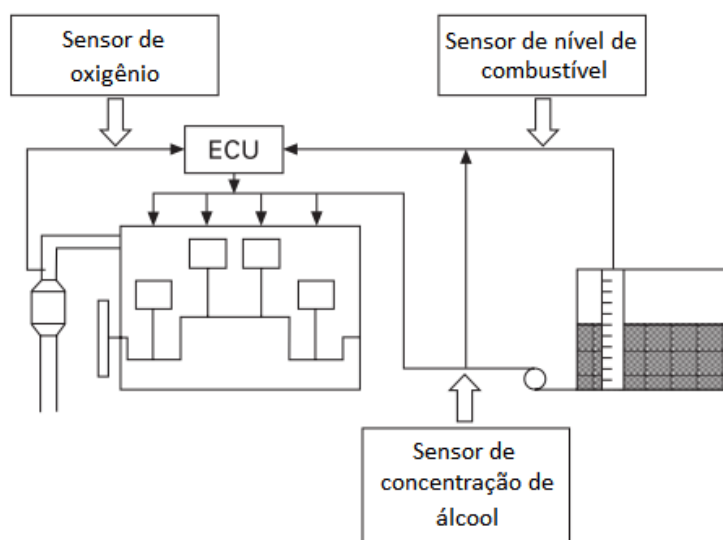
Figura 3 – Ciclo Otto



Fonte: Universidade Federal do Rio Grande do Sul [2009?].

No caso dos motores *flex*, que podem utilizar dois tipos de combustíveis simultaneamente, há um sensor (sonda lambda) que reconhece o combustível utilizado e ajusta a combustão de acordo com as condições estequiométricas ideais (FOLKSON, 2014). Essa sonda é formada por uma célula com um eletrólito sólido e, durante a passagem de corrente elétrica, transfere os elétrons para os íons de oxigênio, de modo a determinar se a mistura está rica ou pobre (pouco ou muito oxigênio, respectivamente). Essa informação é então processada pela Unidade de Controle da Injeção Eletrônica, que identifica o combustível e injeta a quantidade ideal do mesmo (HIGA, 2011). A Figura 4 apresenta um esquema do funcionamento do sensor de combustível do motor *flex fuel*.

Figura 4 – Esquema de funcionamento do sensor de combustível do motor *flex fuel*



Fonte: Adaptado de Folkson (2014).

Por permitir a escolha entre gasolina e álcool, ou uma mistura dos dois combustíveis, esse tipo de veículo se mostra como preferência do consumidor, pois torna a escolha do combustível mais dinâmica, flexível e, assim, menos previsível, afetando o modo como as emissões desses veículos impactam no meio. Isso demonstra, claramente, a necessidade de se estudar os efeitos causados pelas emissões de poluentes desses veículos ao meio ambiente, em especial devido à sua crescente notoriedade no mercado e na frota circulante (DARDIOTIS *et al.*, 2015; SUAREZ-BERTOIA *et al.*, 2015). Cassiano (2016) avaliou as emissões de veículos flex em percursos urbano e rodoviário, utilizando três misturas combustíveis (27%, 85% e 100% de etanol). O autor encontrou um aumento no consumo e emissão durante o horário de pico e com o aumento da velocidade em percurso rodoviário, e elevação nas emissões de CO e CO₂ ao aumentar a proporção de etanol na mistura, e presença de HC somente quando utilizou-se 100% de etanol (CASSIANO, 2016).

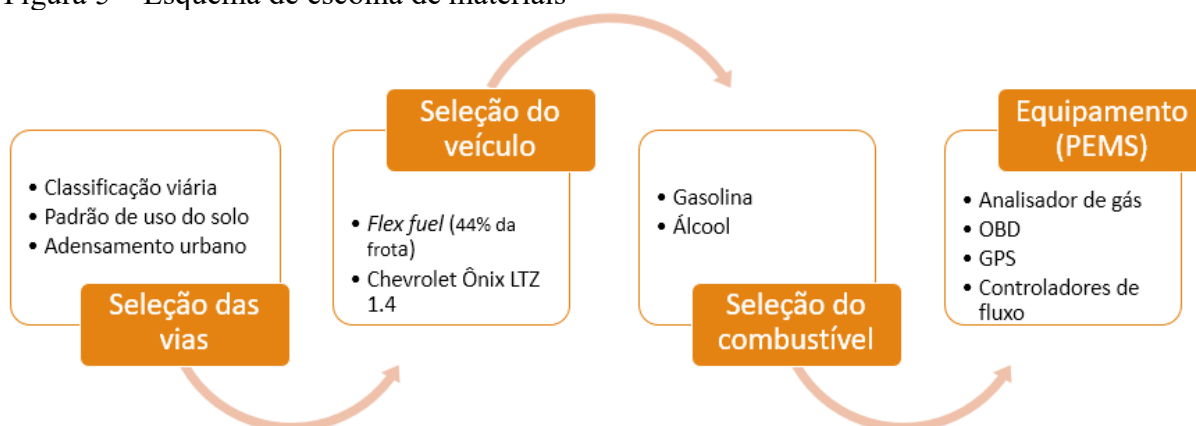
5 MATERIAIS E MÉTODOS

A busca de relações entre diferentes variáveis e a caracterização de populações e fenômenos definem a chamada pesquisa descritiva (GIL, 2002). No contexto de procedimentos técnicos, a utilização de experimentação caracteriza a chamada pesquisa experimental (GIL, 2002). Assim, o presente trabalho enquadra-se nas duas definições anteriores, tendo seus materiais e suas etapas metodológicas descritos a seguir.

5.1 Materiais utilizados

A Figura 5 apresenta o esquema geral para escolha dos materiais para a parte experimental. Cada parte do processo será explicada em detalhes nos próximos itens.

Figura 5 – Esquema de escolha de materiais

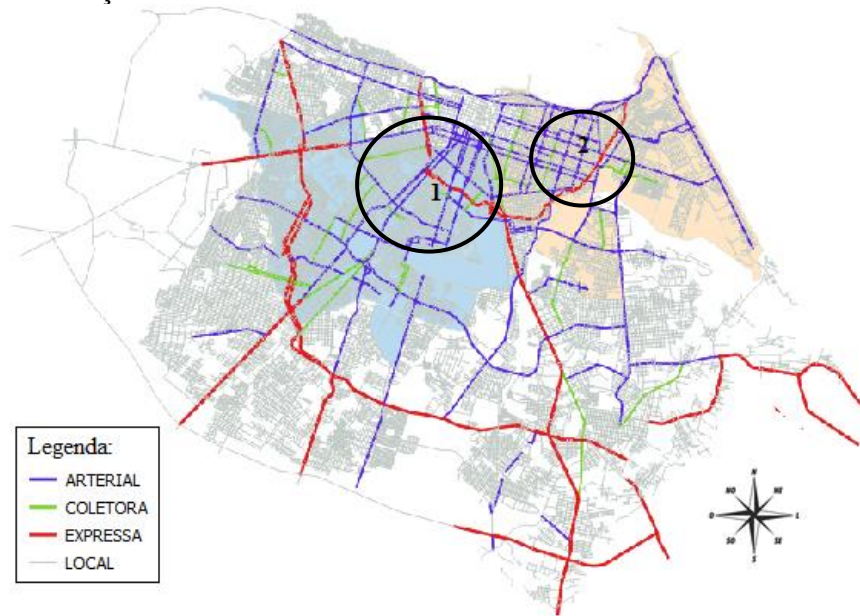


Fonte: Elaborada pela autora (2017).

5.1.1 Local de estudo

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados dados do anexo 10 da LUOS de Fortaleza (FORTALEZA, 2015), que contém a classificação das vias urbanas de Fortaleza-CE, conforme Figura 6, juntamente com bases de dados de adensamento comercial e residencial e de padrão de uso do solo da cidade, da Agência Reguladora do Estado do Ceará (ARCE) (2012) e da Secretaria de Finanças de Fortaleza (SEFIN) (2015). A área azulada e circulada na Figura 4 foi definida como Área 1, enquanto a área avermelhada, também circulada, foi definida como Área 2.

Figura 6 – Classificação viária de Fortaleza–CE



Fonte: Adaptado de Agência Reguladora do Estado do Ceará (2012).

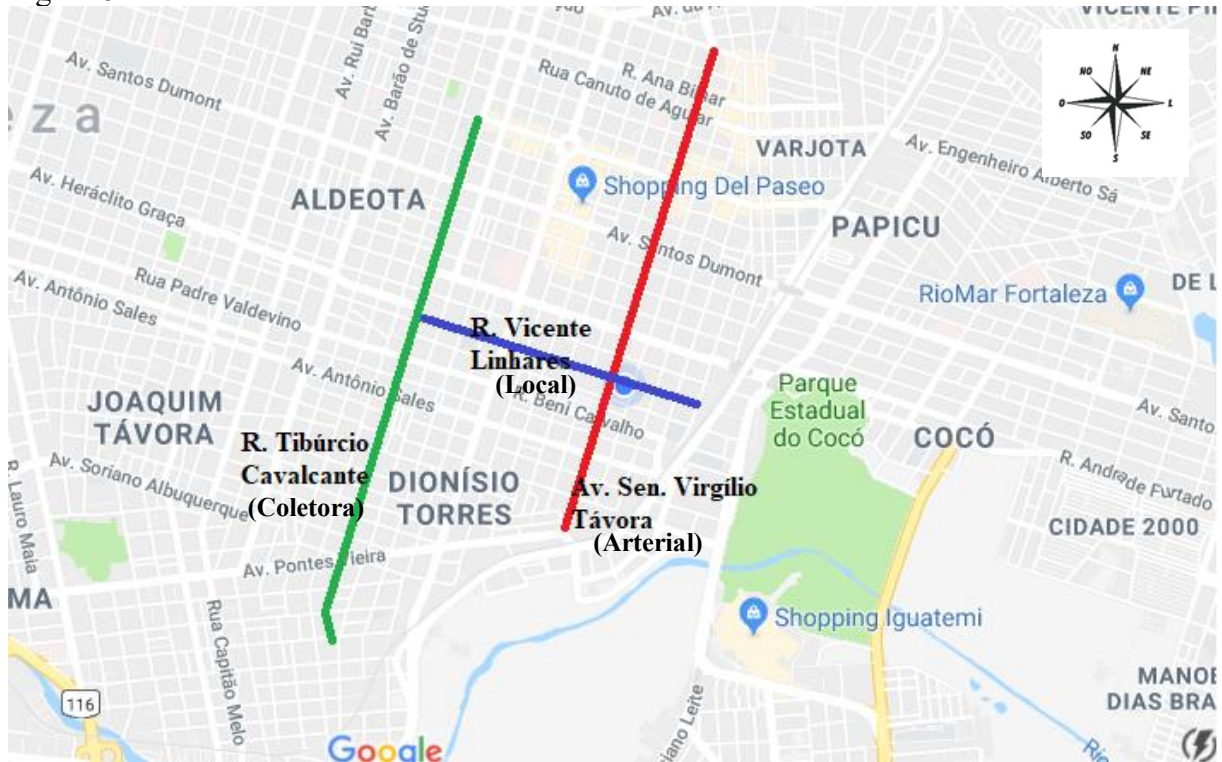
A partir da análise dos dados disponíveis, foram selecionadas vias das duas regiões selecionadas. As vias da Área 1 estão destacadas na Figura 7, e as vias da Área 2 encontram-se destacadas na Figura 8. As informações foram resumidas no Quadro 2.

Figura 7 – Vias selecionadas da Área 1



Fonte: Adaptado de Google Maps® (2017).

Figura 8 – Vias selecionadas da Área 2



Fonte: Adaptado de Google Maps® (2017).

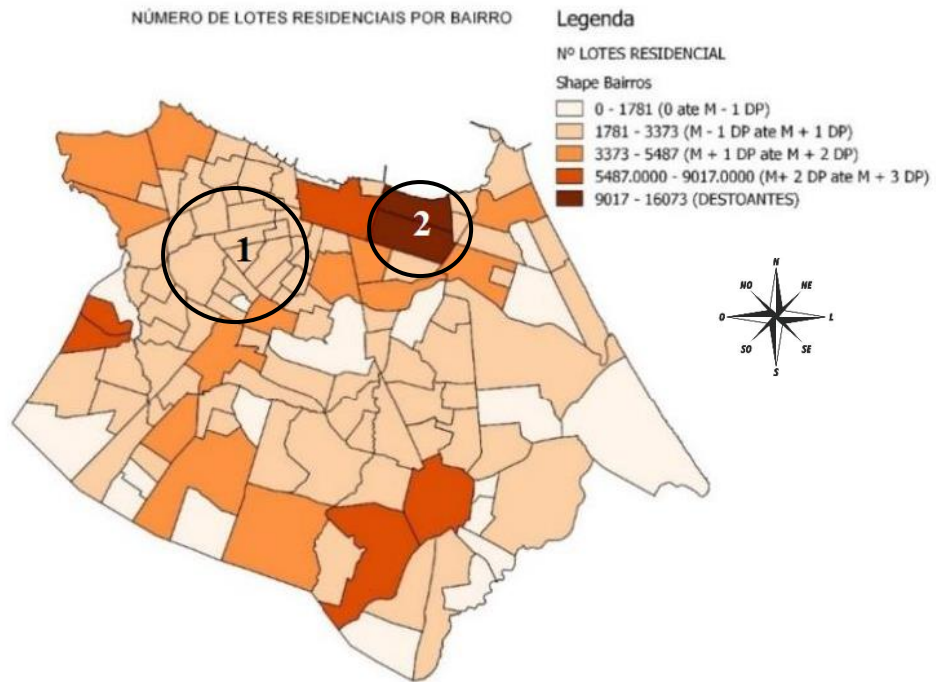
Quadro 2 – Vias selecionadas

Classificação	Via – Área 1	Via – Área 2
Arterial	Av. 13 de Maio	Av. Senador Virgílio Távora
Coletora	Av. Jovita Feitosa	Rua Tibúrcio Cavalcante
Local	Rua Érico Mota	Rua Vicente Linhares

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

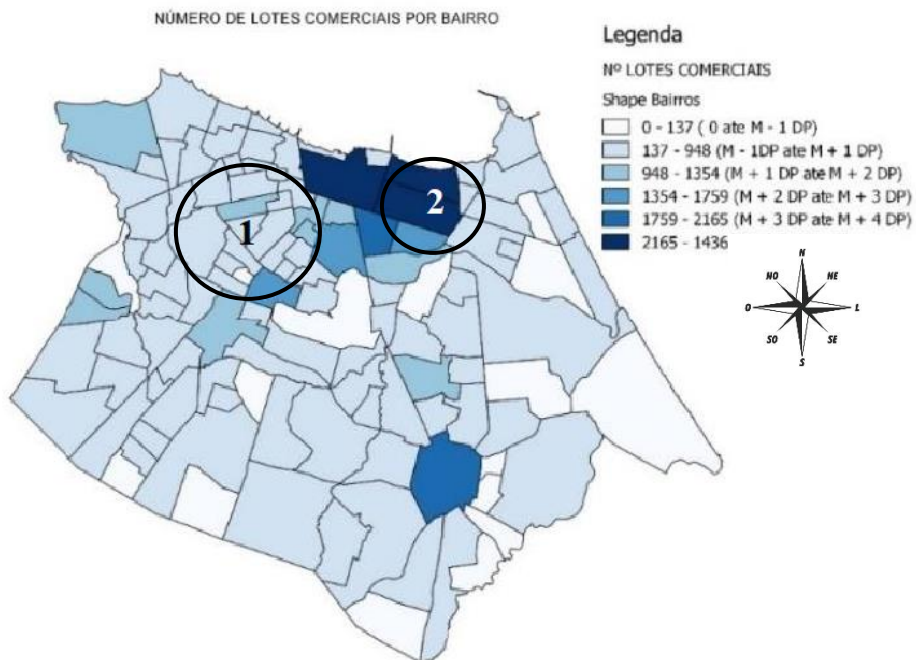
A Área 1 (zona oeste), que inclui bairros como Parquelândia, Amadeu Furtado e Fátima, e engloba as Regionais III e IV, apresenta padrão de uso do solo predominantemente habitacional. A Área 2 (zona leste), que é delimitada pela Regional II, apresenta um padrão de uso do solo mais misto, com maior densidade comercial e residencial, abrangendo bairros como Aldeota e Dionísio Torres. São áreas com notório potencial de geração e atração de viagens em virtude de seus diferentes níveis de densidades residencial (Figura 9) e comercial (Figura 10) e de padrão de uso do solo da Área 1 (Figura 11) e Área 2 (Figura 12), respectivamente, com as regiões de estudo identificadas.

Figura 9 – Densidade residencial na cidade de Fortaleza-CE



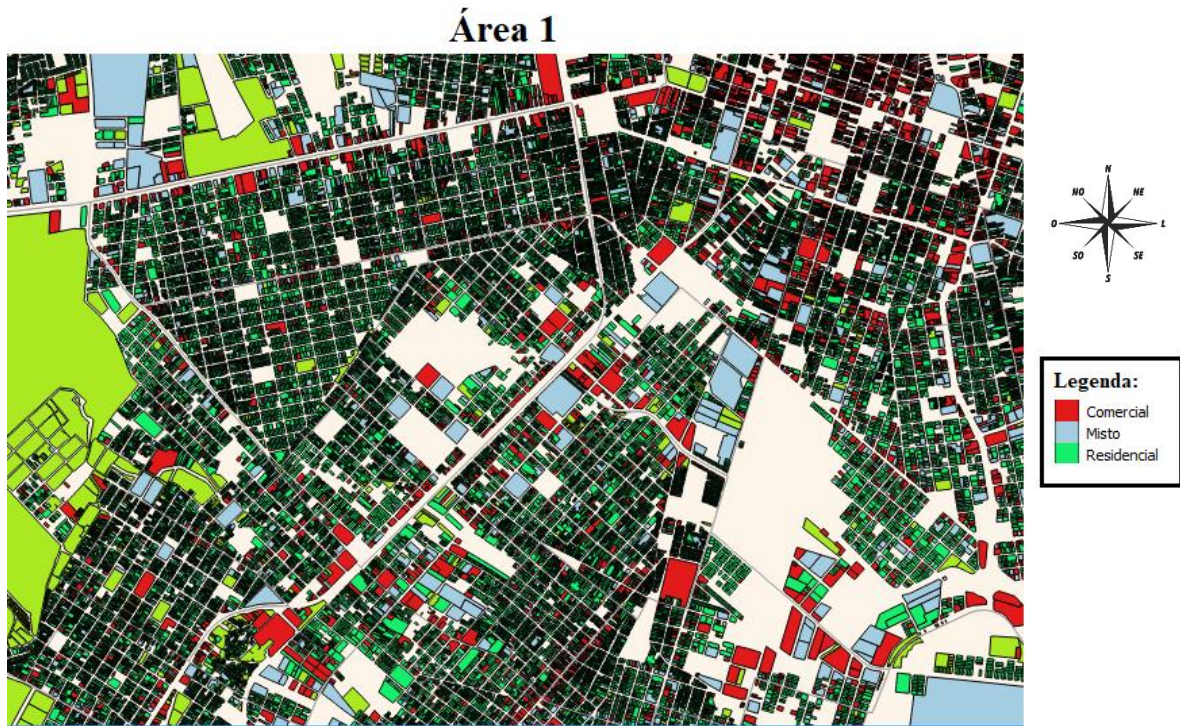
Fonte: Adaptado de Vieira *et al* (2017).

Figura 10 – Densidade comercial na cidade de Fortaleza-CE



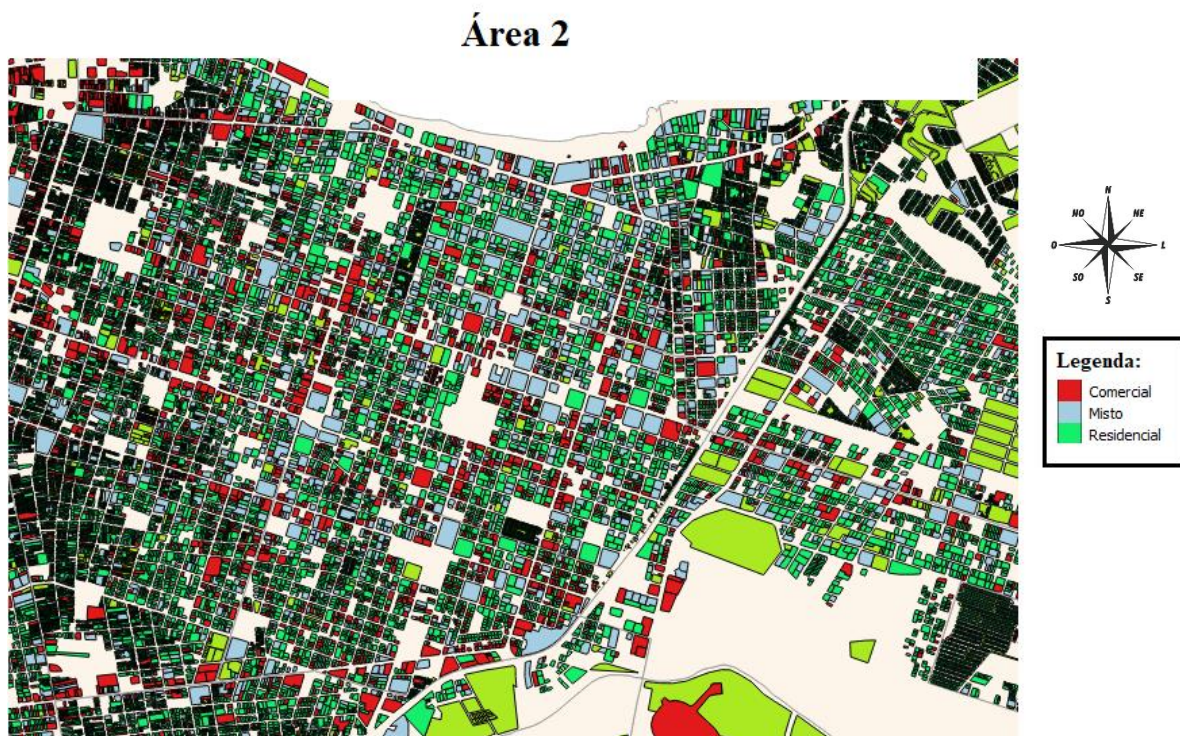
Fonte: Adaptado de Vieira *et al* (2017).

Figura 11 – Padrão de uso do solo da Área 1



Fonte: ARCE (2012).

Figura 12 – Padrão de uso do solo da Área 2



Fonte: Agência Reguladora do Estado do Ceará (2012).

5.1.2 Veículo utilizado

A escolha do veículo *flex fuel* ocorreu em função da representatividade do mesmo na composição da frota, que hoje ocupa 35% da frota nacional e 44% da frota de Fortaleza-CE, seguido dos veículos movidos a gasolina com 39,4%, e dos movidos a Diesel com 8,14%. Diante disso, juntamente com os automóveis representando cerca de 55% da frota total, nacional e local, e em decorrência de sua disponibilidade, o veículo escolhido foi do tipo *hatch* com motor ciclo Otto da marca Chevrolet, modelo Ônix LTZ 1.4, cujas especificações encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Especificações do veículo

Especificações Ônix LTZ 1.4	
Massa (kg)	1067
Transmissão	Manual, 5 marchas
Volume do tanque (L)	54
Consumo de etanol (km/L)	7,9 _(ur) /9,6 _(rod)
Consumo de gasolina (km/L)	11,5 _(ur) /13,6 _(rod)
Certificação	PROCONVE L6

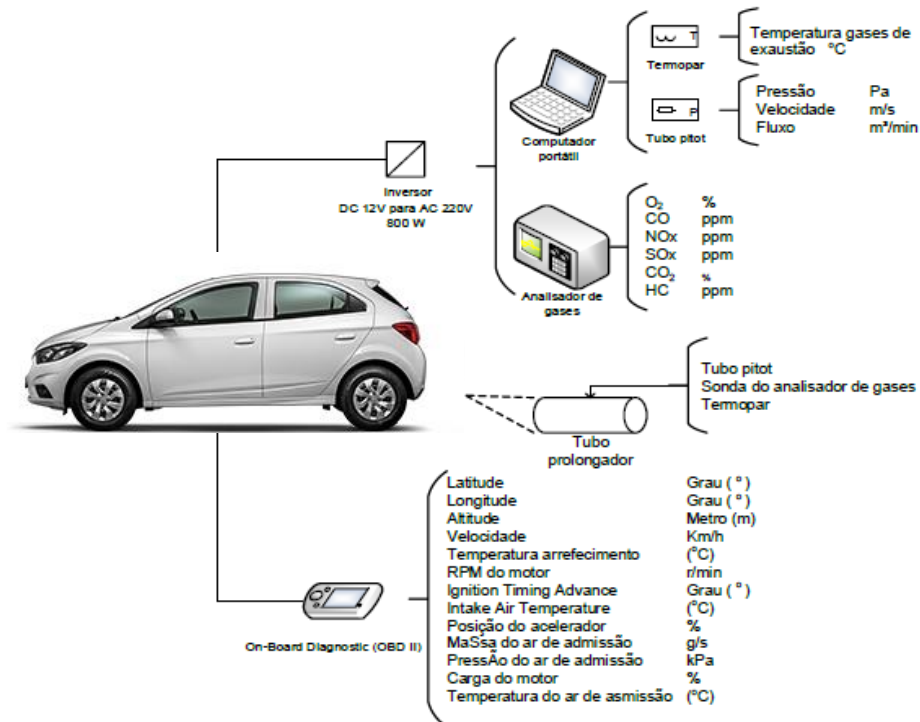
Fonte: Elaborada pela autora (2017).

A fim de reduzir o número de variáveis do trabalho, a gasolina foi escolhida como combustível único a ser utilizado, embora o veículo pudesse ser movido utilizando álcool. Para atestar a qualidade do combustível, o mesmo teve amostras coletadas para realização de testes de conformidade. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes, do curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará (UFC), e os resultados encontram-se no ANEXO A – RESULTADO DA ANÁLISE DE COMBUSTÍVEL.

5.1.3 Equipamento de coleta

Para a coleta das emissões, utilizou-se um sistema de medição portátil de emissão (PEMS), formado por um analisador de gás, um aparelho de diagnóstico a bordo (OBD), um sistema global de localização (GPS) e controladores de fluxo. A Figura 13 apresenta um fluxograma com o procedimento geral para a coleta.

Figura 13 – Procedimento geral para coleta



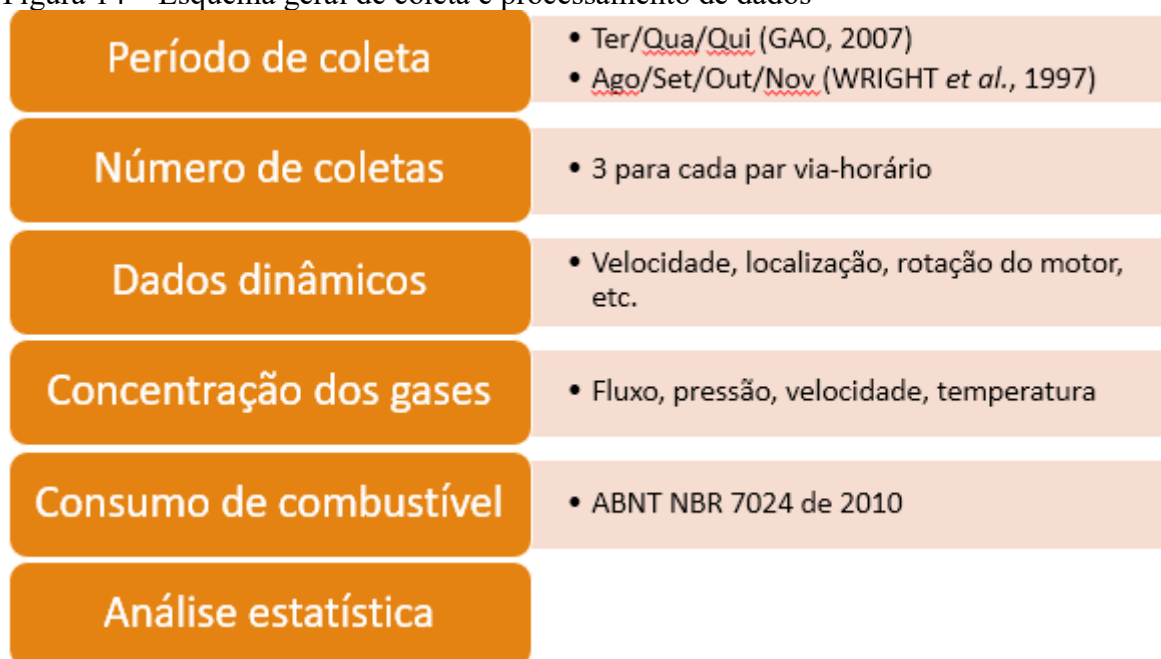
Fonte: Adaptado de Cassiano (2016).

O funcionamento do sistema começa com o acionamento do veículo e início do processo de combustão. Os gases do escapamento são direcionados, através de um tubo de conexão, até o analisador de gases, passando pela sonda Pitot. Depois, eles são liberados ao meio. Concomitantemente, o OBD obtém os dados instantâneos do veículo, como aceleração e localização.

5.2 Métodos utilizados

O método de coleta escolhido para o desenvolvimento desta pesquisa foi a coleta em campo com equipamento embarcado, utilizado por Cassiano (2016), a fim de se obter dados reais de consumo de combustível e emissão de poluentes (CO₂ e NO_x) nas diferentes classificações de via da cidade. O esquema geral é apresentado na Figura 14.

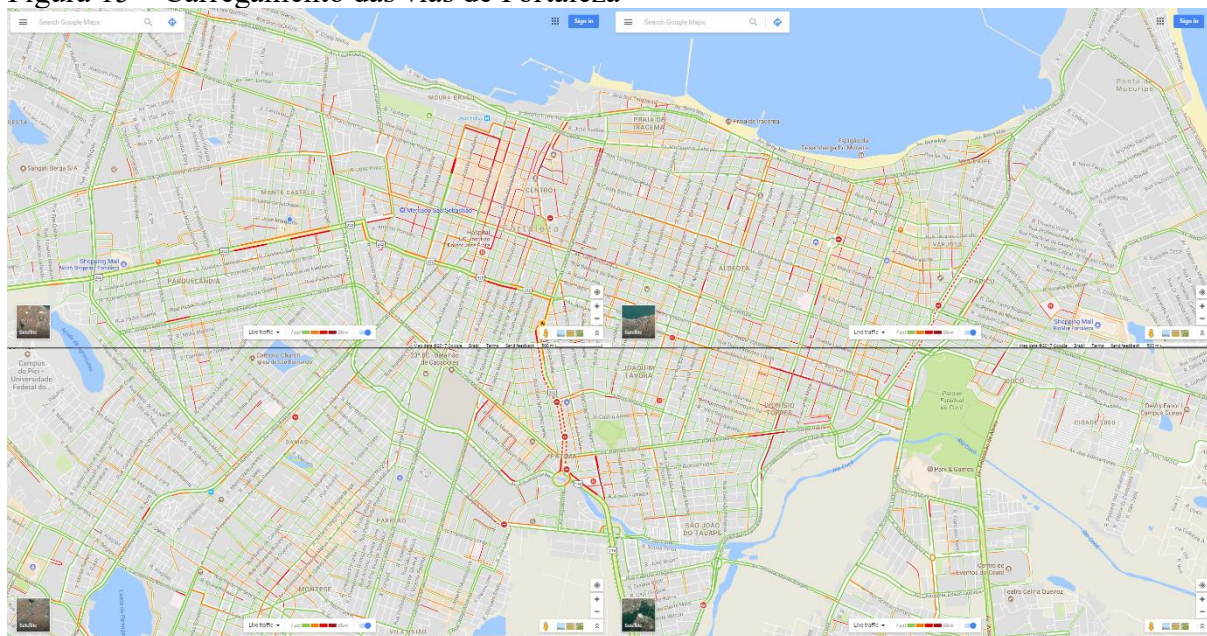
Figura 14 – Esquema geral de coleta e processamento de dados



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Os horários de coleta ficaram enquadrados em momentos no qual a dinâmica do tráfego se apresenta de forma típica, selecionados com auxílio de imagens do carregamento viário instantâneo fornecido pelo Google Maps®. A Figura 15 retrata esse aspecto em um instante do dia na cidade, onde quanto mais vermelho, maior o carregamento. Os horários de maior carregamento da via (pico) foram de 6:30 às 8:30 e de 17:30 às 19:30, que se caracterizam por um elevado número de viagens com motivo escola e trabalho; e o de menor fluxo (fora pico) foram de 8:30 às 10:30 e de 14:30 às 16:30.

Figura 15 – Carregamento das vias de Fortaleza



Fonte: Google Maps® (2017).

Os dias da semana mais adequados para estudos de tráfego, de acordo com a literatura, são terça, quarta e quinta-feira, pois apresentam um fluxo mais homogêneo e menos influenciado por eventos como fim-de-semana (GAO, 2007). O período do ano, também, considerado mais adequado para realização de pesquisas de tráfego é aquele com menos influência de férias escolares, recessos, e inverno, quando aplicável, pois apresentam menor variação de fluxo (WRIGHT *et al.*, 1997).

As coletas ocorreram com pelo menos duas pessoas dentro do veículo: uma para conduzir o veículo, e outra pessoa para realizar as leituras dos equipamentos. Os dispositivos mencionados no item anterior, como mostrado na Figura 13, possibilitaram a coleta de dados dinâmicos fornecidos pelo veículo, sendo eles: velocidade (km/h), rotação do motor (rpm), carga do motor (%), temperatura do líquido de arrefecimento (°C), posição do acelerador (%), temperatura do ar de admissão (°C) e massa de ar de admissão pelo tempo (g/s). O dispositivo disponibiliza ainda, a cada instante (frequência de 1 Hz), dados do motor e do posicionamento do veículo, o último através das variáveis: latitude, longitude (ambas em grau decimal) e altitude (m).

Os fluxos dos gases de escape foram determinados com o auxílio de uma sonda tipo Pitot, fornecendo: fluxo do fluido (cm³/min), pressão do fluido (Pa), velocidade do fluido (m/s) e temperatura ambiente (°C). As concentrações dos gases emitidos durante as coletas foram examinadas por um analisador de gases portátil certificado, e as emissões determinadas

em g/km e em g/s foram obtidas através de conversões e operações matemáticas calculadas a partir dos dados obtidos pelos aparelhos utilizados nas coletas.

Para determinação do consumo de combustível, foi utilizada a norma ABNT NBR 7024 de 2010, que contém um método para estimação do consumo de combustível de veículos rodoviários automotores leves. De acordo com a norma, o gás do escapamento é apurado enquanto o veículo está em operação e, assim, o consumo de combustível é calculado, em L/100km, através da massa dióxido de carbono (CO₂).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos após coleta e processamento dos dados serão apresentados no decorrer deste capítulo. Eles ilustram os ciclos de condução e os perfis de consumo de combustível e emissão de poluentes das vias em estudo (av. 13 de Maio, av. Jovita Feitosa, rua Érico Mota, av. Senador Virgílio Távora, rua Tibúrcio Cavalcante e rua Vicente Linhares), considerando características como classificação funcional (arterial, coletora, local), adensamento urbano, padrão de uso do solo (comercial, residencial, misto) e variação do volume de tráfego ao longo do dia (horário de pico e fora pico).

Ressalta-se que o combustível utilizado foi a gasolina, apesar de o veículo ser *flex fuel*, e os poluentes monitorados foram o dióxido de carbono (CO₂) e os óxidos de nitrogênio (NO_x), a partir da coleta de NO₂.

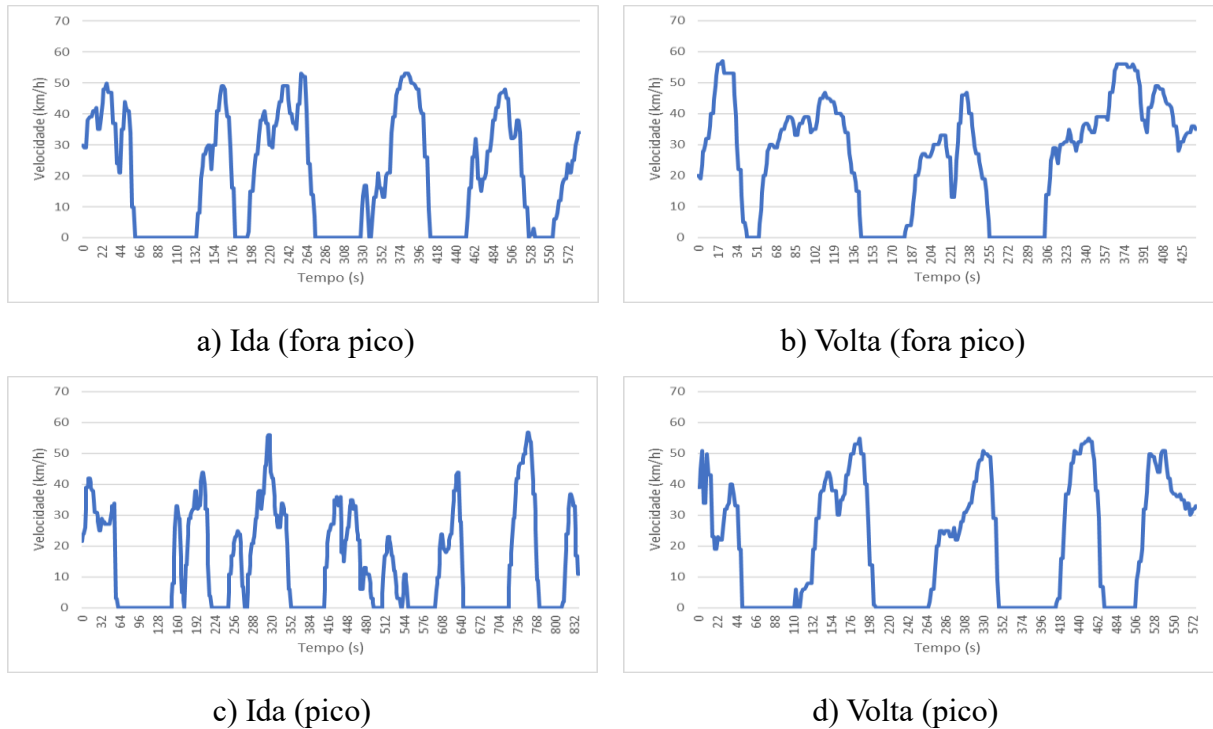
6.1 Ciclo de condução

O ciclo de condução é um fator de grande relevância para a avaliação do consumo de combustível e emissão de poluentes. Ele consiste em uma sequência de quatro modos de operação do veículo, sendo eles: cruzeiro, quando a aceleração é nula e a velocidade é diferente de zero; aceleração, quando a taxa de mudança de velocidade é positiva; desaceleração, quando essa taxa é negativa; e parado, quando ambas a velocidade e a aceleração são nulas. Desta forma, é possível criar um perfil de condução que mais se aproxime da realidade de tráfego da região em estudo (MARTINS, 2005).

A partir das coletas realizadas, foi possível gerar os ciclos de condução de cada uma das vias estudadas, nos horários de menor e maior volume de veículos (fora pico e pico). Desta forma, é possível entender melhor a dinâmica específica de cada via.

A Figura 16 apresenta os principais ciclos de condução da Avenida 13 de Maio (3.2 km de extensão), tanto no sentido Noroeste/Sudeste (ida) quanto no sentido Sudeste/Noroeste (volta), gerados a partir de passagens realizadas na via. Em uma visão geral, é possível perceber uma presença marcante dos eventos de *stop-and-go* (parada e saída do veículo), típico de vias arteriais, em especial em cruzamentos semaforizados.

Figura 16 – Ciclos de condução da av. 13 de Maio

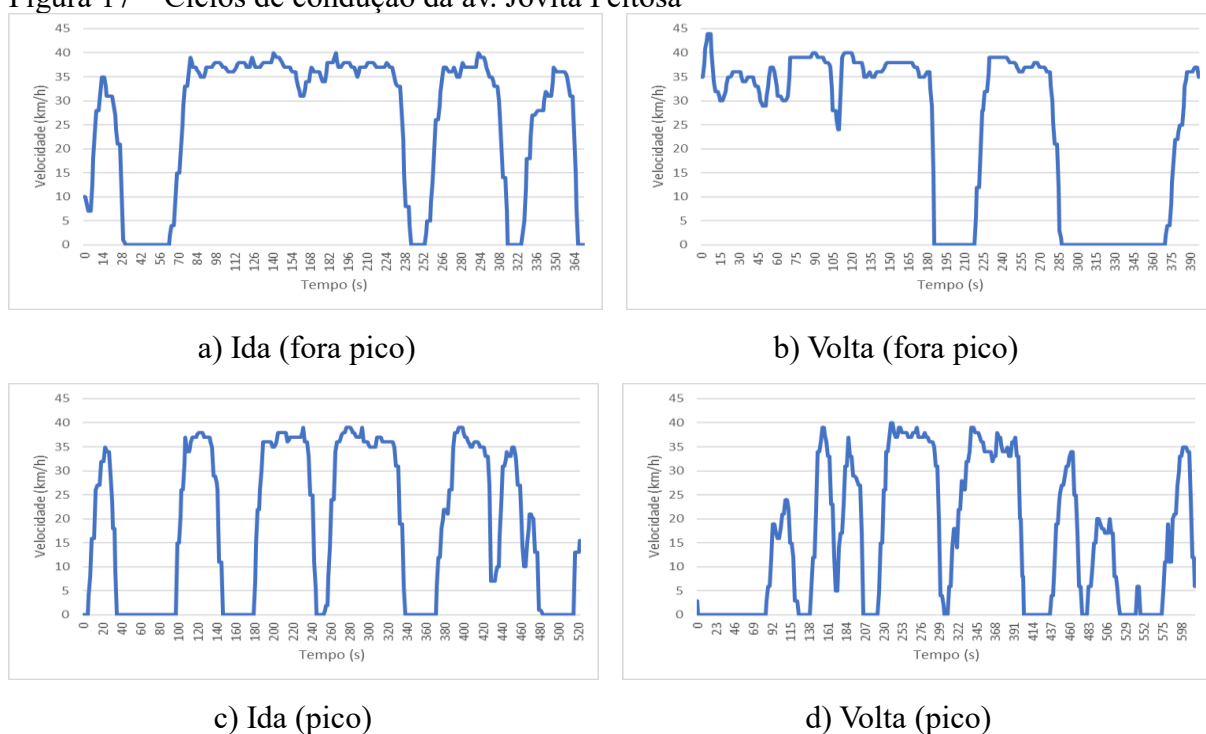


Fonte: Elaborada pela autora (2017).

No horário fora pico (manhã), foi encontrada uma velocidade média de 20,8 km/h ($s \pm 3,41$ km/h), com velocidade média no trecho ida de 18,5 km/h ($s \pm 2,00$ km/h) e, no trecho volta, de 23,1 km/h ($s \pm 3,00$ km/h). Isso mostra que, neste horário, há um maior carregamento em um sentido da via (ida). No horário de pico (noite), no entanto, as velocidades médias nos trechos de ida e volta ficaram muito próximas, 18,3 km/h ($s \pm 5,54$ km/h) e 18,1 km/h ($s \pm 2,34$ km/h), respectivamente, com a ida apresentando um desvio padrão mais de duas vezes maior, levando a uma média de 18,2 km/h ($s \pm 3,48$ km/h). Existe uma diferença de 12,6% (cerca de 2,6 km/h) nas velocidades médias dos dois horários, o que pode indicar que não existe um horário de pico e fora pico bem definidos nesta via, e que a dinâmica do tráfego é bastante homogênea durante o dia, sendo confirmado pelos ciclos de condução.

A Figura 17 apresenta os ciclos de condução de algumas coletas realizadas na Avenida Jovita Feitosa (2,8 km de extensão), com o sentido Sudoeste/Nordeste sendo a ida, e o sentido Nordeste/Sudoeste, a volta. É possível ver uma clara distinção dos horários de pico (noite) e fora pico (manhã), com o primeiro bastante caracterizado pelos eventos de *stop-and-go*, e o segundo apresentando uma maior fluidez, com velocidades mais constantes e próximas à velocidade máxima de uma via coletora (40 km/h).

Figura 17 – Ciclos de condução da av. Jovita Feitosa

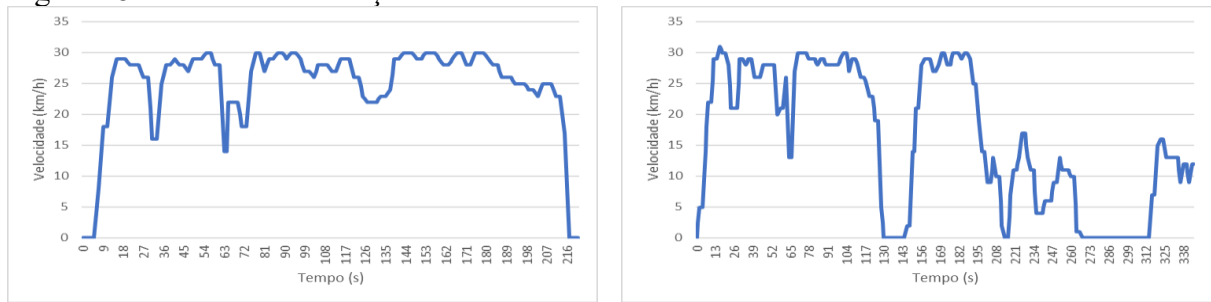


Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Ao analisar o horário fora pico, tem-se uma velocidade média de 22,7 km/h ($s \pm 3,52$ km/h), com a velocidade média da ida de 23,0 km/h ($s \pm 4,64$ km/h), e da volta de 22,3 km/h ($s \pm 2,50$ km/h), mostrando uma homogeneidade nos dois sentidos da via nesse horário, apesar da ida apresentar um desvio padrão maior. O horário de pico apresentou uma velocidade média de 19,5 km/h ($s \pm 2,78$ km/h), 14,1% (cerca de 3,2 km/h) menor que a média no horário fora pico. Apesar da pequena diferença absoluta, ao analisar os ciclos de condução para os dois horários, é possível verificar a grande alteração da dinâmica de tráfego. Os sentidos de ida e volta geraram velocidades médias de 20,1 km/h ($s \pm 2,12$ km/h) e 13,3 km/h ($s \pm 2,62$ km/h), respectivamente, indicando um maior carregamento no sentido volta.

Para a rua Érico Mota (1,6 km de extensão), como pode ser observado pela Figura 18, no horário fora pico (manhã), verifica-se uma alta fluidez, com velocidade praticamente constante e próxima à máxima para vias locais (30 km/h), enquanto no horário de pico (noite), observa-se a ocorrência de *stop-and-go*, apesar de ainda apresentar uma boa fluidez no começo da via (Figura 18b). Vale ressaltar que, apesar de ser uma via local, a rua Érico Mota apresenta duas interseções semaforizadas, e é preferencial nas outras interseções.

Figura 18 – Ciclos de condução da rua Érico Mota



a) Fora pico

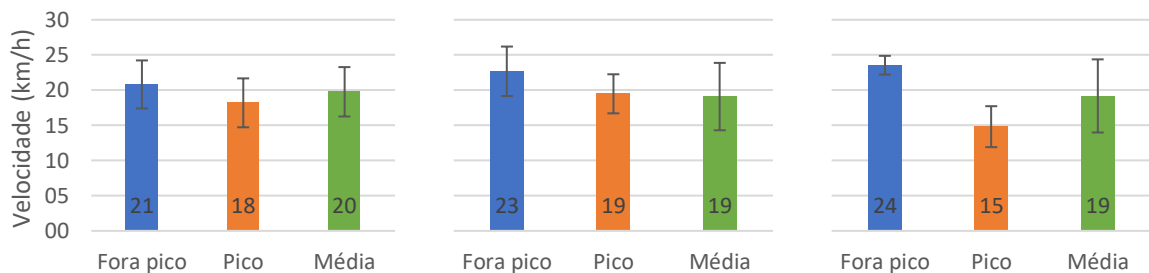
b) Pico

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

O horário fora pico apresentou uma velocidade média de 23,6 km/h ($s \pm 1,33$ km/h), e o horário de pico obteve uma velocidade média de 14,8 km/h ($s \pm 2,91$ km/h), uma diferença de 37% (cerca de 8,7 km/h), revelando um impacto na dinâmica da via durante o pico.

A Figura 19 apresenta as velocidades médias e seus respectivos desvios padrões para as vias da Área 1 nos horários de pico e fora pico, e também a velocidade média geral, conforme discutido previamente.

Figura 19 – Velocidades médias para vias da Área 1



a) Av. 13 de Maio

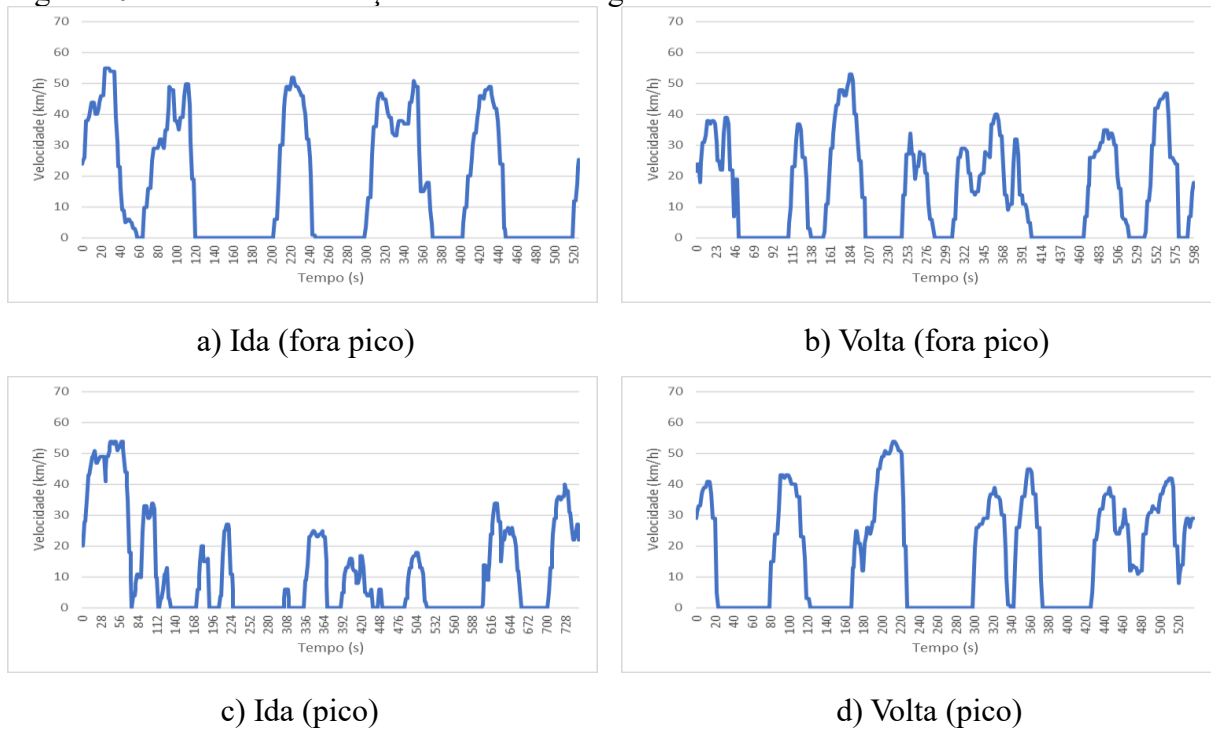
b) Av. Jovita Feitosa

c) Rua Érico Mota

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Na Figura 20, encontram-se alguns ciclos de condução para a avenida Senador Virgílio Távora (2,6 km de extensão), apresentando os sentidos Nordeste/Sudoeste (ida) e Sudoeste/Nordeste (volta) tanto no horário fora pico (tarde), quanto no horário de pico (noite). Mais uma vez, por ser uma via arterial, a ocorrência de *stop-and-go* é bastante significativa.

Figura 20 – Ciclos de condução da av. Sen. Virgílio Távora

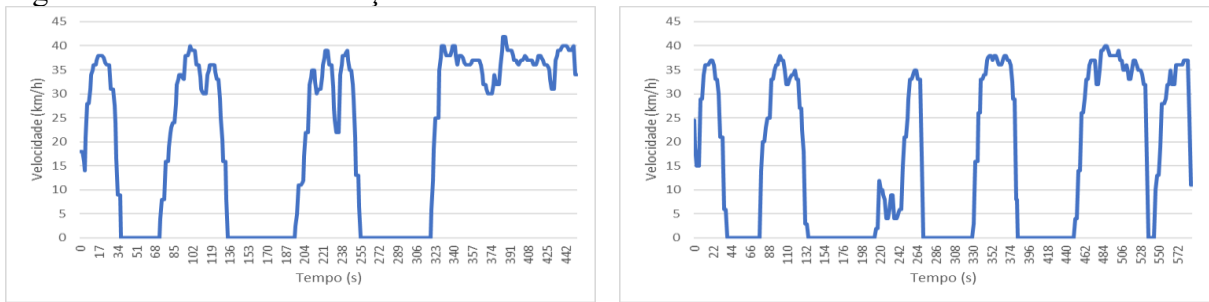


Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Para o horário fora pico, obteve-se uma velocidade média de 17,5 km/h ($s \pm 3,67$ km/h), com o sentido ida apresentando velocidade média de 20,3 km/h ($s \pm 2,82$ km/h), e o sentido de volta, 14,6 km/h ($s \pm 1,03$ km/h), o que indica um maior congestionamento neste sentido. No horário de pico, no entanto, a velocidade média obtida foi 14,8 km/h ($s \pm 2,56$ km/h), com a ida de 13,3 km/h ($s \pm 1,42$ km/h), e a volta de 16,3 km/h ($s \pm 2,77$ km/h). Neste horário, o maior carregamento encontrou-se no sentido ida, enquanto o sentido volta não apresentou grandes alterações, com diferença de 11% (cerca de 1,7 km/h). No aspecto geral, a diferença de velocidade para os dois horários foi de 15% (cerca de 2,6 km/h), devido, principalmente, às alterações da dinâmica de tráfego no sentido ida da via.

A rua Tibúrcio Cavalcante (2,8 km de extensão), no sentido Nordeste/Sudoeste, como pode ser observado pelo Figura 21, não apresentou grandes diferenças na dinâmica de tráfego entre os horários fora pico (manhã) e pico (manhã). Observa-se, também, a marcante presença de *stop-and-go*, devido, principalmente, às suas interseções semaforizadas, e que, ao longo da via, foi possível atingir velocidades próximas à máxima para vias coletoras (40 km/h) nos dois horários.

Figura 21 – Ciclos de condução da rua Tibúrcio Cavalcante



a) Fora pico

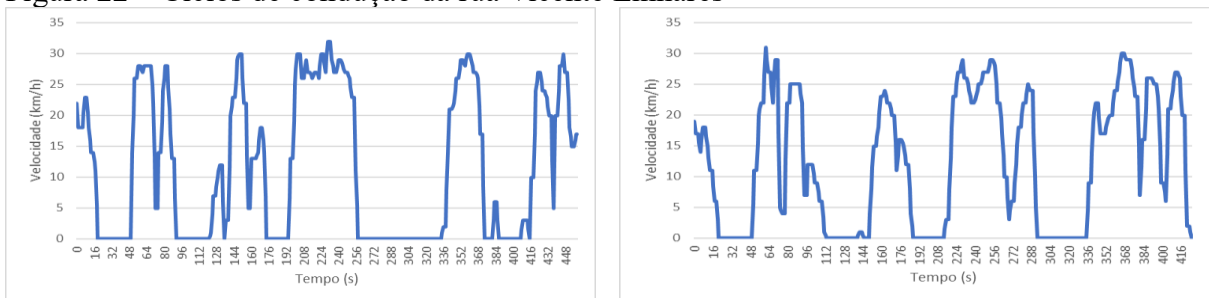
b) Pico

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Para o horário fora pico, obteve-se uma velocidade média de 19,1 km/h ($s \pm 1,02$ km/h), e de 17,0 km/h ($s \pm 2,31$ km/h) para o horário de pico, uma diferença de 11% (cerca de 2,11 km/h).

A Figura 22 apresenta os ciclos de condução para a rua Vicente Linhares (1,5 km de extensão). É possível observar a ocorrência de eventos de *stop-and-go* muito frequentes, devido à presença de interseções semaforizadas, apesar de ser uma via local. Além disso, essa via é preferencial na maioria das suas interseções não semaforizadas, o que resulta que em uma melhora na fluidez de tráfego.

Figura 22 – Ciclos de condução da rua Vicente Linhares



a) Fora pico

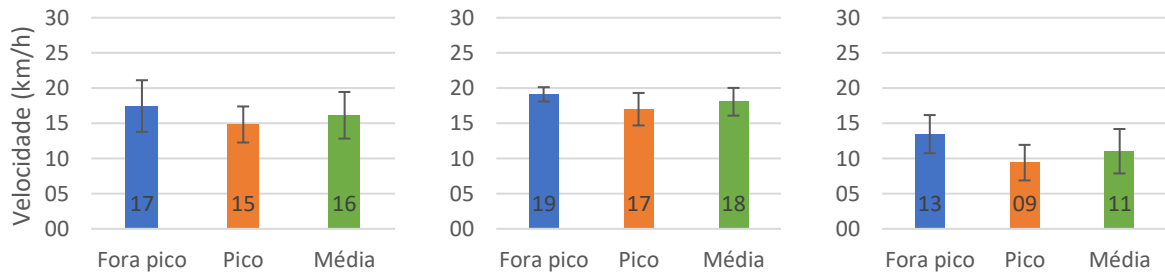
b) Pico

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

No horário fora pico (tarde), obteve-se uma velocidade média de 13,5 km/h ($s \pm 2,71$ km/h), enquanto no horário de pico (noite), obteve-se velocidade média de 9,4 km/h ($s \pm 2,53$ km/h), resultando em uma diferença de 30% (cerca de 4,1 km/h). O impacto na dinâmica da via no horário de pico é facilmente observado através dos ciclos de condução, que apresentam uma redução da velocidade e maior frequência de paradas no meio do trecho neste horário.

A Figura 23 apresenta as velocidades médias e seus respectivos desvios padrões para as vias da Área 2 nos horários de pico e fora pico, e também a velocidade média geral, conforme discutido anteriormente.

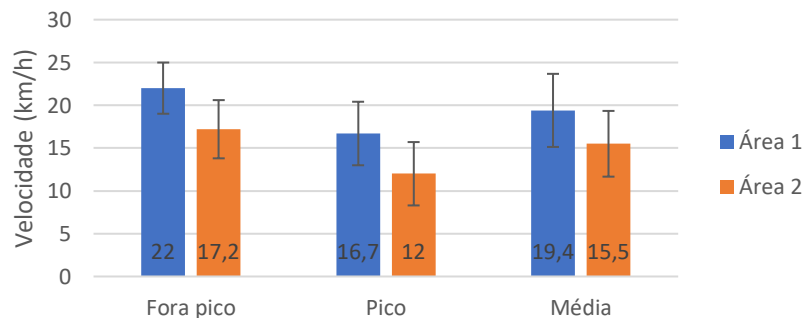
Figura 23 – Velocidades médias para vias da Área 2



a) Av. Sen. Virgílio Távora b) Rua Tibúrcio Cavalcante c) Rua Vicente Linhares
 Fonte: Elaborada pela autora (2017).

A velocidade média para as vias da Área 1 (av. 13 de Maio, av. Jovita Feitosa e rua Érico Mota) foi de 22,0 km/h ($s \pm 2,99$ km/h) no horário fora pico, e de 16,7 km/h ($s \pm 3,71$ km/h) no horário de pico, uma diferença de 24,1% (cerca de 5,3 km/h). Para a Área 2 (av. Sen. Virgílio Távora, rua Tibúrcio Cavalcante e rua Vicente Linhares), as velocidades médias foram de 17,2 km/h ($s \pm 3,40$ km/h) e de 14,0 km/h ($s \pm 3,70$ km/h), para os horários fora pico e pico, respectivamente, apresentando uma diferença de 18,4% (cerca de 3,2 km/h). Esses resultados podem ser observados na Figura 24. A diferença entre as Áreas 1 e 2 foi de 21,8% (cerca de 4,8 km/h) para o horário fora pico, e 16,2% (cerca de 2,7 km/h) para o horário de pico.

Figura 24 – Velocidades médias das Áreas 1 e 2



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Em uma visão geral, percebe-se uma alteração na dinâmica de tráfego mais significativa em vias coletoras e locais durante o horário de pico, com exceção da rua Tibúrcio

Cavalcante, que não apresentou grandes alterações. As vias arteriais, apesar de manterem-se relativamente constantes durante os dois períodos do dia, apresentaram alterações mais significativas em um dos sentidos (ida ou volta) quando no horário de pico. Em todos os casos, a velocidade média obtida para o horário de pico foi menor. Percebe-se, ainda, que a Área 1 apresentou maiores impactos na dinâmica de tráfego e na velocidade média no horário de pico, o que sugere que esta área apresenta características distintas da Área 2.

6.2 Adensamento urbano

O adensamento urbano caracteriza-se pela relação entre área construída e uma área na cidade ou região, ou seja, quanto mais área construída em uma região, maior seu adensamento. Como apresentado no capítulo 4, item 4.1.1, as áreas em estudo apresentam características distintas em relação ao adensamento urbano, sendo a Área 2 extremamente adensada, tanto em relação a residências, quanto a comércio; e a Área 1 é baixa ou moderadamente adensada nas duas categorias.

A Tabela 3 apresenta os valores médios de consumo de combustível e emissão de poluentes para a Área 1, incluindo as três vias (av. 13 de Maio, a. Jovita Feitosa e rua Érico Mota), para os horários fora pico e pico.

Tabela 3 – Valores médios de emissão e consumo para a Área 1

	CO ₂ (g/km)		NO _x (g/km)		Consumo (L/100km)	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Fora pico	0,109	0,021	0,00000940	0,0000048	0,0051	0,0010
Pico	0,183	0,100	0,00000885	0,0000048	0,0086	0,0047
Média	0,146	0,080	0,00000912	0,0000047	0,0068	0,0037

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Percebe-se, através da Tabela 3, que os níveis de emissão de CO₂ e o consumo aumentam em 67,9% e 68,6%, respectivamente, durante o horário de pico, enquanto a emissão de NO_x diminui em 5,9% no mesmo período. Utilizando o teste de hipóteses, com um intervalo de confiança de 95%, há indícios para rejeitar a hipótese nula (igualdade entre as médias) para o CO₂ e o consumo, enquanto não foram encontrados indícios suficientes para rejeitar a hipótese nula para o NO_x. Desta forma, existem diferenças significativas apenas na emissão de CO₂ e no consumo de combustível quando em horário de pico.

A Tabela 4 apresenta os valores instantâneos médios de consumo de combustível e emissão de poluentes para a Área 2, incluindo as três vias (av. Sen. Virgílio Távora, rua Tibúrcio Cavalcante e rua Vicente Linhares), para os horários de pico e fora pico.

Tabela 4 – Valores médios de emissão e consumo para a Área 2

	CO ₂ (g/km)		NO _x (g/km)		Consumo (L/100km)	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Fora pico	0,138	0,057	0,00002310	0,0000245	0,0065	0,0027
Pico	0,147	0,100	0,00001034	0,0000053	0,0069	0,0025
Média	0,142	0,054	0,00001645	0,0000182	0,0067	0,0026

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Ao analisar os valores da Tabela 4, verifica-se um aumento de 6,5% na emissão de CO₂, e de 6,2% no consumo de combustível, e uma redução de 55,2% na emissão de NO_x, no horário de pico. Foi realizado o teste de hipóteses para os três parâmetros, e, em todos os casos, em um intervalo de 95% de confiança, não foram encontrados indícios suficientes para rejeitar a hipótese nula (igualdade entre as médias).

Foi realizada, então, uma análise comparativa dos horários fora pico e pico das Áreas 1 e 2. Para o horário fora pico, foi encontrada uma diferença de 26,2% para CO₂, 146,0% para NO_x, e 26,2% para o consumo entre as duas áreas. Para o horário de pico, as diferenças foram, respectivamente, 19,6%, 16,9% e 19,6%. Fazendo o teste de hipóteses para cada um dos indicadores, com um intervalo de 95% de confiança, não foram obtidos indícios suficientes para rejeitar a hipótese nula (igualdade entre as médias) em nenhum dos casos.

Comparando as médias gerais das Áreas 1 e 2, obteve-se uma diferença de 2,4% para a emissão de CO₂ e o consumo, e de 80,3% para a emissão de NO_x. O teste de hipóteses, no entanto, dentro de um intervalo de 95% de confiança, não forneceu indícios suficientes para rejeitar a hipótese nula (igualdade entre as médias) para nenhum dos três indicadores. Assim, não se observam diferenças significativas nas emissões de CO₂ e NO_x, e no consumo de combustível ao se comparar os valores médios das duas áreas.

Fazendo uma análise global, foram encontradas diferenças significativas nas emissões de CO₂ e consumo de combustível entre horário de pico e fora pico apenas na Área 1, não se obtendo o mesmo resultado para o NO_x nesta região. Para a Área 2, não foi possível confirmar a hipótese de diferenças entre os dois horários, sugerindo que o aumento do adensamento contribui para uma constância de emissões e consumo ao longo do dia em regiões mais adensadas. A comparação entre os horários de pico e fora pico das duas regiões

também não forneceu suporte suficiente para confirmar diferenças de consumo e emissões nestas áreas e horários. Além disso, também não foram encontradas diferenças expressivas entre as médias gerais das duas áreas.

Diante do exposto, pode-se concluir que a diferença encontrada dentro da Área 1 entre os horários fora pico e pico podem ser explicadas pelas características geométricas da via, tal como uma maior distância entre os *links* nesta área. Além disso, a proximidade da Área 1 com o centro da cidade favorece um maior volume de tráfego nesta região, ao menos em um momento do dia (hora de pico), o que também favorece a significativa diferença para os resultados de consumo e emissão para a Área 1 entre dois horários.

Essa proximidade pode explicar, ainda, a expressiva semelhança entre as Áreas 1 e 2 quanto às médias de consumo e emissão, confirmadas pelo teste de hipótese, com 95% de confiança. Desta forma, não foram encontradas evidências significativas que corroborem para consideração do adensamento como parâmetro sensível o suficiente para comparar consumo de combustível e emissão de poluentes em regiões de diferentes graus de adensamento, em oposição ao encontrado por Hong e Shen (2013) e Hong e Goodchild (2014). As duas análises, entretanto, consideravam viagens na cidade, geralmente de regiões mais distantes e menos adensadas para regiões centrais e mais adensadas, não levando em consideração a classificação funcional da via.

6.3 Padrão de uso do solo

O padrão de uso do solo caracteriza-se pela função do terreno onde há ou não algo construído. Ele pode ser do tipo residencial, comercial, misto (residencial e comercial simultaneamente), saúde, agricultura, industrial, etc. Neste trabalho, foram considerados apenas os lotes classificados como residencial (verde), comercial (vermelho) ou misto (azul) pelo banco de dados fornecido pela ARCE.

As Áreas 1 e 2 possuem características diferentes quanto ao padrão de uso do solo, com a Área 1 apresentando um perfil predominantemente residencial, enquanto a Área 2 apresenta uma ocorrência maior de uso tipo comercial e misto, apesar de ainda ter alta incidência do uso tipo residencial, conforme discutido no item 4.1.1 deste trabalho. Observa-se, no entanto, que a Área 1 serve de conexão entre regiões mais periféricas (mais residencial) e regiões mais centrais da cidade (mais comercial). Os itens a seguir apresentam os resultados para consumo de combustível e emissão de CO₂ e NO_x.

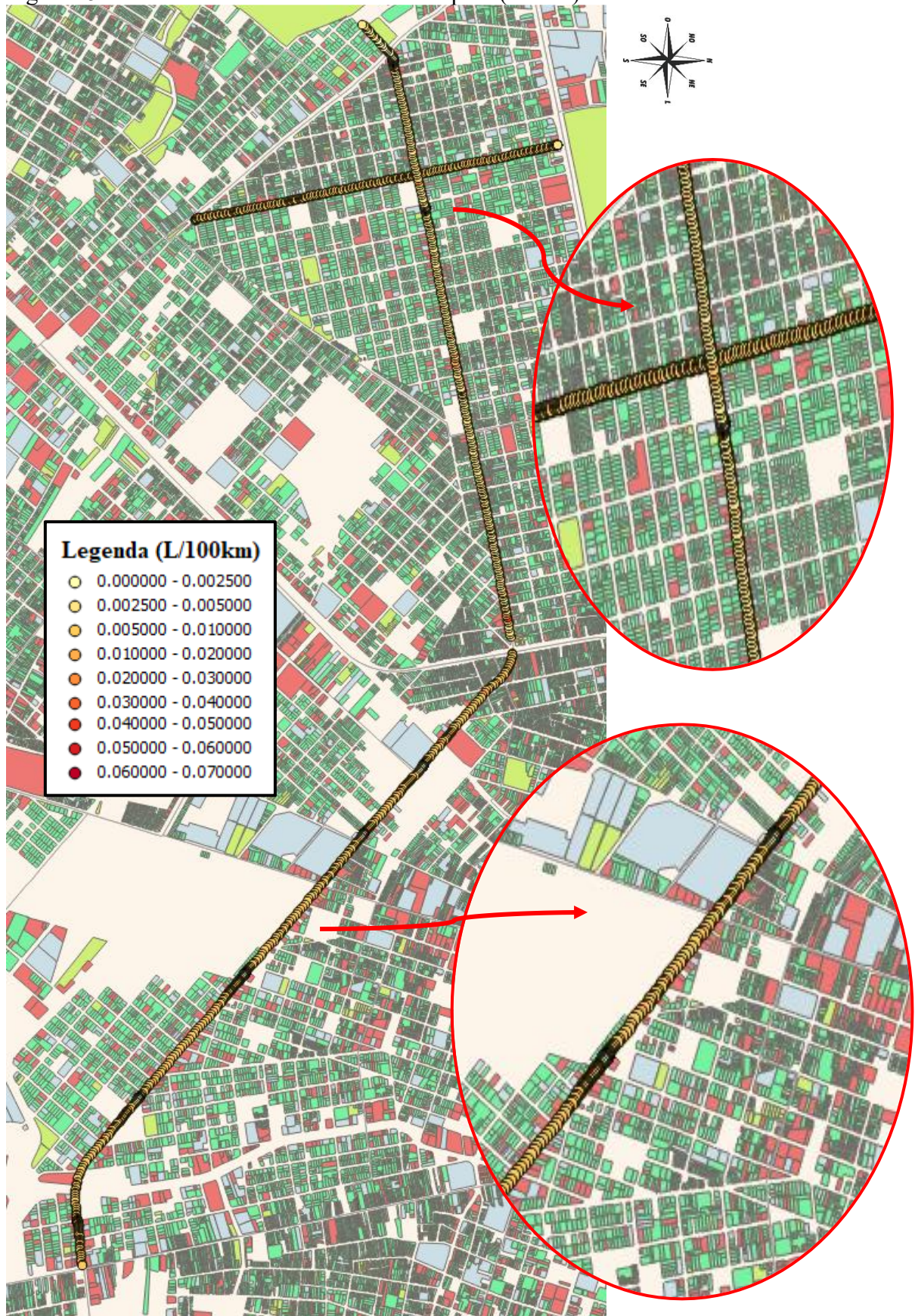
6.3.1 Consumo de combustível

O processo de queima do combustível é regulado a partir de diversos fatores de dinâmica do veículo, e resultam no consumo do mesmo. É deste processo que se originam grande parte dos poluentes atmosféricos veiculares, e pode ser determinado de diversas formas. Neste trabalho, como mencionado, foi utilizada a norma ABNT NBR 7024 (2010) para estimativa do consumo de combustível. Os Apêndices A e B apresentam a visão geral das duas áreas em relação ao consumo, nos horários fora pico e pico.

A Figura 25 apresenta o consumo instantâneo para os ciclos de condução no item 6.1 para a Área 1 no horário fora pico. Para a rua Érico Mota, verifica-se uma uniformidade ao longo de todo o trecho, com valores entre 0,004 e 0,006 L/100km. O mesmo para a av. Jovita Feitosa e av. 13 de Maio (sentido volta), com valores geralmente entre 0,002 e 0,004 L/100km, atingindo 0,04 L/100km e 0,02 L/100km, respectivamente, próximo a cruzamentos. No sentido ida da av. 13 de Maio, os valores permaneceram próximos a 0,01 L/100km durante toda a via, refletindo os eventos de *stop-and-go* mais frequentes nesse sentido. Esses resultados mostram-se de acordo com o observado para a emissão de CO₂, que foi mais contínua nesse horário, e que será discutido no próximo item.

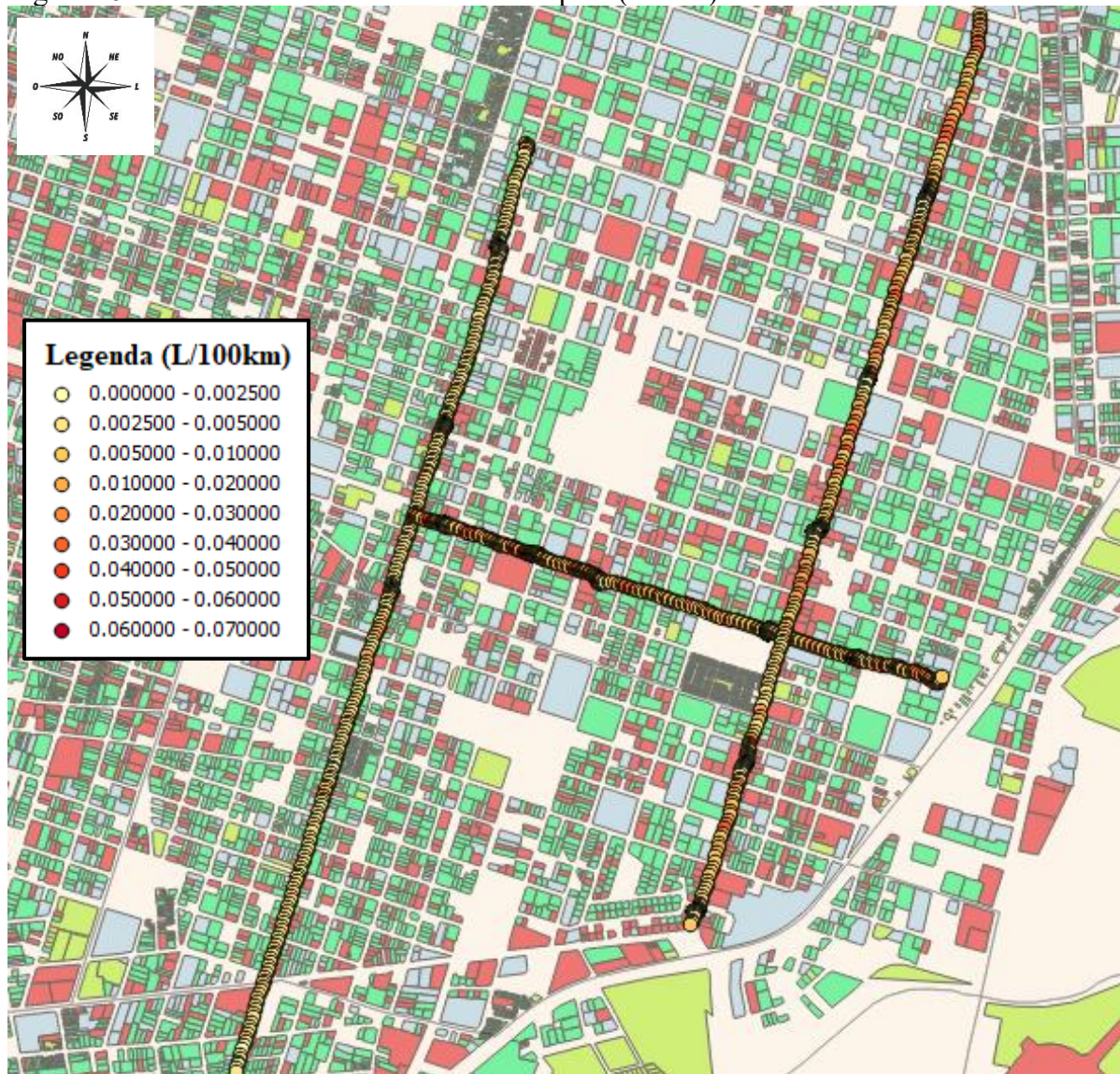
A Figura 26 exibe os resultados de consumo instantâneo para a Área 2 no horário fora pico, de acordo com os ciclos de condução apresentados no item 6.1. A rua Tibúrcio Cavalcante obteve picos de até 0,02 L/100km próximos a cruzamentos e lotes tipo comercial, porém a maior parte do trecho ficou entre 0 e 0,004 L/100km. A rua Vicente Linhares e a av. Sen. Virgílio Távora denotaram níveis mais elevados, com a primeira apresentando valores entre 0,004 e 0,01 L/100km na maior parte do trecho, com picos até 0,08 L/100km próximos a estabelecimentos comerciais e cruzamentos; e a segunda com valores normalmente entre 0,002 e 0,006 L/100km, atingindo picos de 0,06 L/100km próximos a lotes de uso comercial ou misto, e a interseções semaforizadas, em especial próximo às avenidas Antônio Justa, Dom Luís, Santos Dumont, Antônio Sales e Pontes Vieira. Os resultados obtidos refletem o encontrado para a emissão de CO₂ nesse horário, com os picos ocorrendo nos mesmos lugares, conforme será visto no próximo item.

Figura 25 – Consumo de combustível no fora pico (Área 1)



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

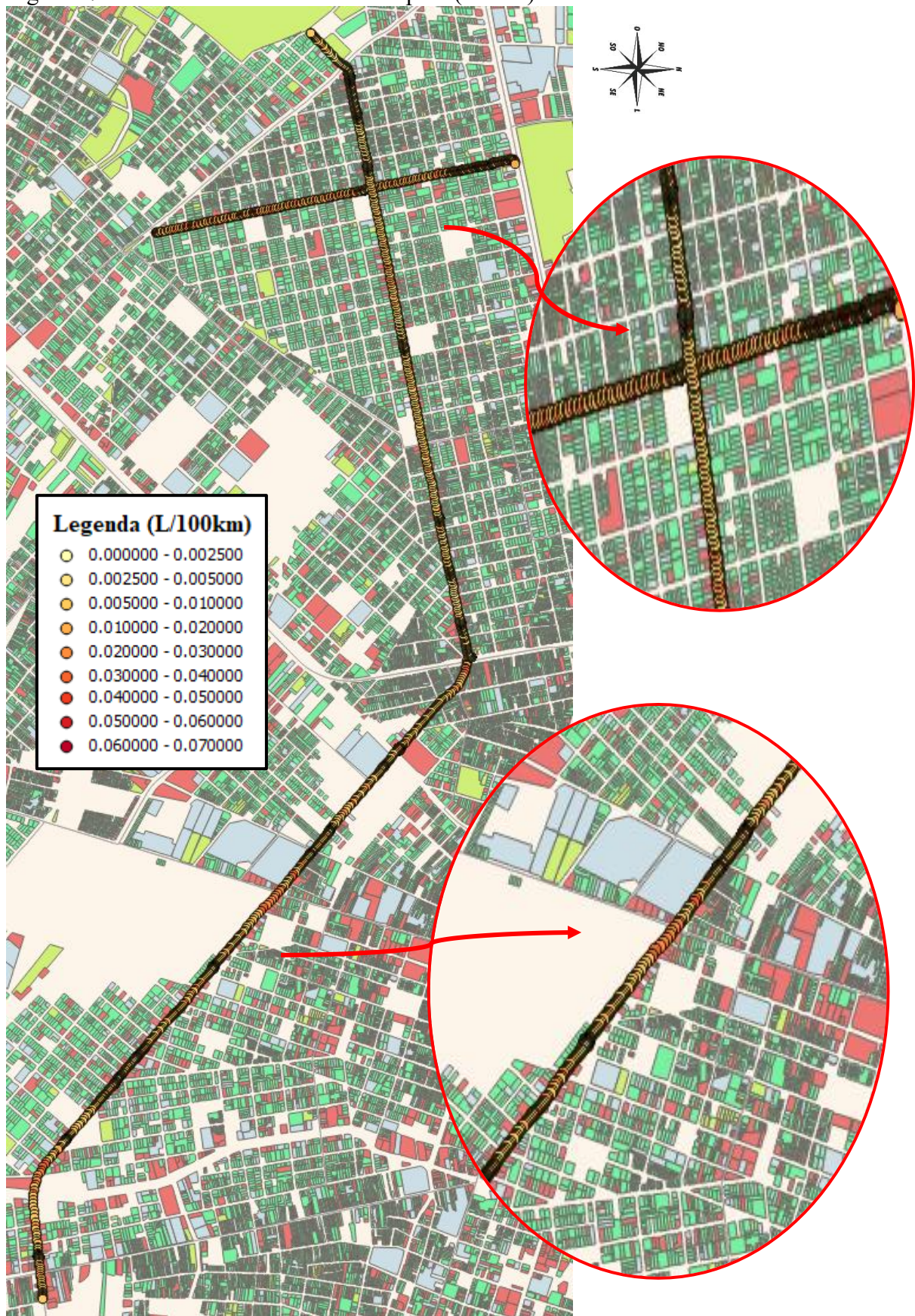
Figura 26 – Consumo de combustível no fora pico (Área 2)



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

A Figura 27 apresenta os resultados de consumo para a Área 1 no horário de pico, em relação aos ciclos de condução do item 6.1. Nota-se um aumento acentuado no consumo para a rua Érico Mota, que passou a apresentar valores entre 0,004 e 0,01 L/100km, atingindo um máximo de 0,03 L/100km próximo ao cruzamento com a av. Bezerra de Menezes. A av. Jovita Feitosa também aumentou os valores do seu intervalo médio, para entre 0,004 e 0,006 L/100km, com acentuação no sentido volta. Seu pico, no entanto, teve redução para 0,03 L/100km, principalmente próximo ao cruzamento com a rua Dom José Lourenço, onde há presença de lotes comerciais. A av. 13 de Maio apresentou intervalo médio entre 0,004 e 0,007 L/100km, alcançando pico de 0,04 L/100km no sentido ida, e de 0,02 L/km no sentido volta, próximo a cruzamentos e lotes comerciais ou mistos.

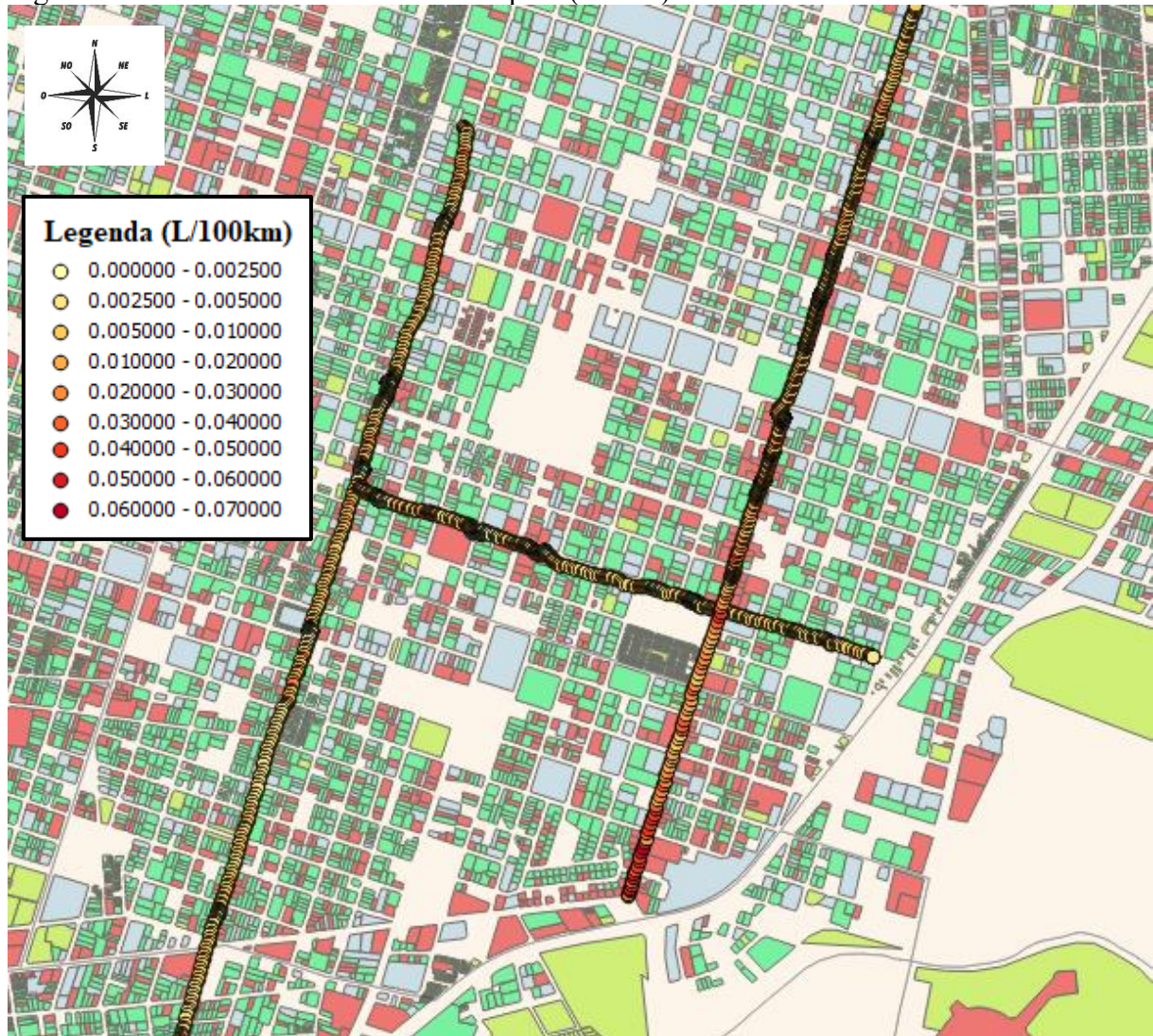
Figura 27 – Consumo de combustível no pico (Área 1)



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

A Figura 28 apresenta os resultados de consumo de combustível instantâneo obtidos para a Área 2 no horário de pico, de acordo com os ciclos de condução do item 6.1.

Figura 28 – Consumo de combustível no pico (Área 2)



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

A rua Tibúrcio Cavalcante apresentou intervalo médio de 0,001 a 0,006 L/100km, atingindo 0,05 L/100km, resultados superiores aos encontrados no horário anterior. Os picos se encontraram, principalmente, próximos à rua Costa Barros, av. Padre Antônio Tomás e av. Antônio Sales, onde há concentração de lotes de uso comercial e misto. A rua Vicente Linhares, ao contrário do esperado, reduziu seu consumo médio, com valores normalmente entre 0,001 e 0,006 L/100km, com picos de até 0,03 L/100km, principalmente próximo à Faculdade Estácio. A av. Sen. Virgílio Távora apresentou intensificação no perfil do sentido ida, com intervalo médio de 0,006 a 0,01 L/100km, e pico de 0,06 L/100km, enquanto o sentido volta ficou com intervalo médio entre 0,001 e 0,004 L/100km, atingindo

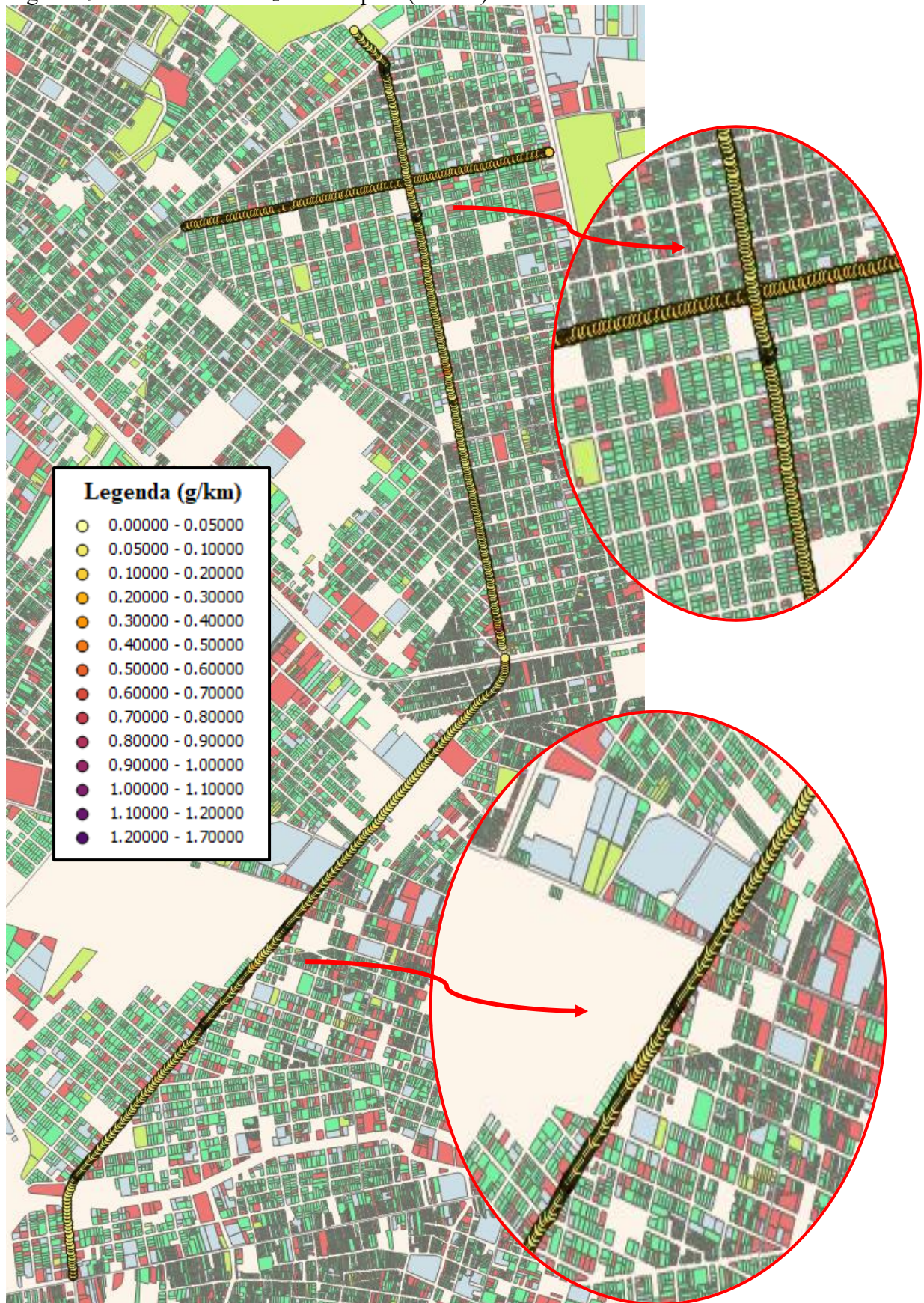
0,05 L/100km. Os picos localizaram-se próximos aos cruzamentos com avenidas importantes da região, como a av. Ponte Vieira, próximo a lotes comerciais e misto, e pontos atratores de tráfego, como o Colégio Santa Cecília.

6.3.2 Dióxido de carbono

O CO₂ é resultado do processo de combustão, como previamente discutido. Ou seja, quanto melhor se der a queima de combustível (geralmente, em fluxo livre), maior a emissão de CO₂, e quanto pior se der essa queima, como quando o veículo está parado, menor é a emissão. Em contrapartida, eventos de *stop-and-go* aumentam a emissão por exigir um consumo maior de combustível ao iniciar o movimento do veículo. Ainda, eventos ao longo da via podem influenciar na média da viagem, como sucessão de semáforos verdes, aumentando a fluidez em horário de pico, ou sucessão de semáforos vermelhos, causando o efeito contrário em horário fora pico, o que gera resultados contra intuitivos. Os Apêndices C e D apresentam a visão geral das duas áreas em relação à emissão de CO₂, nos horários fora pico e pico.

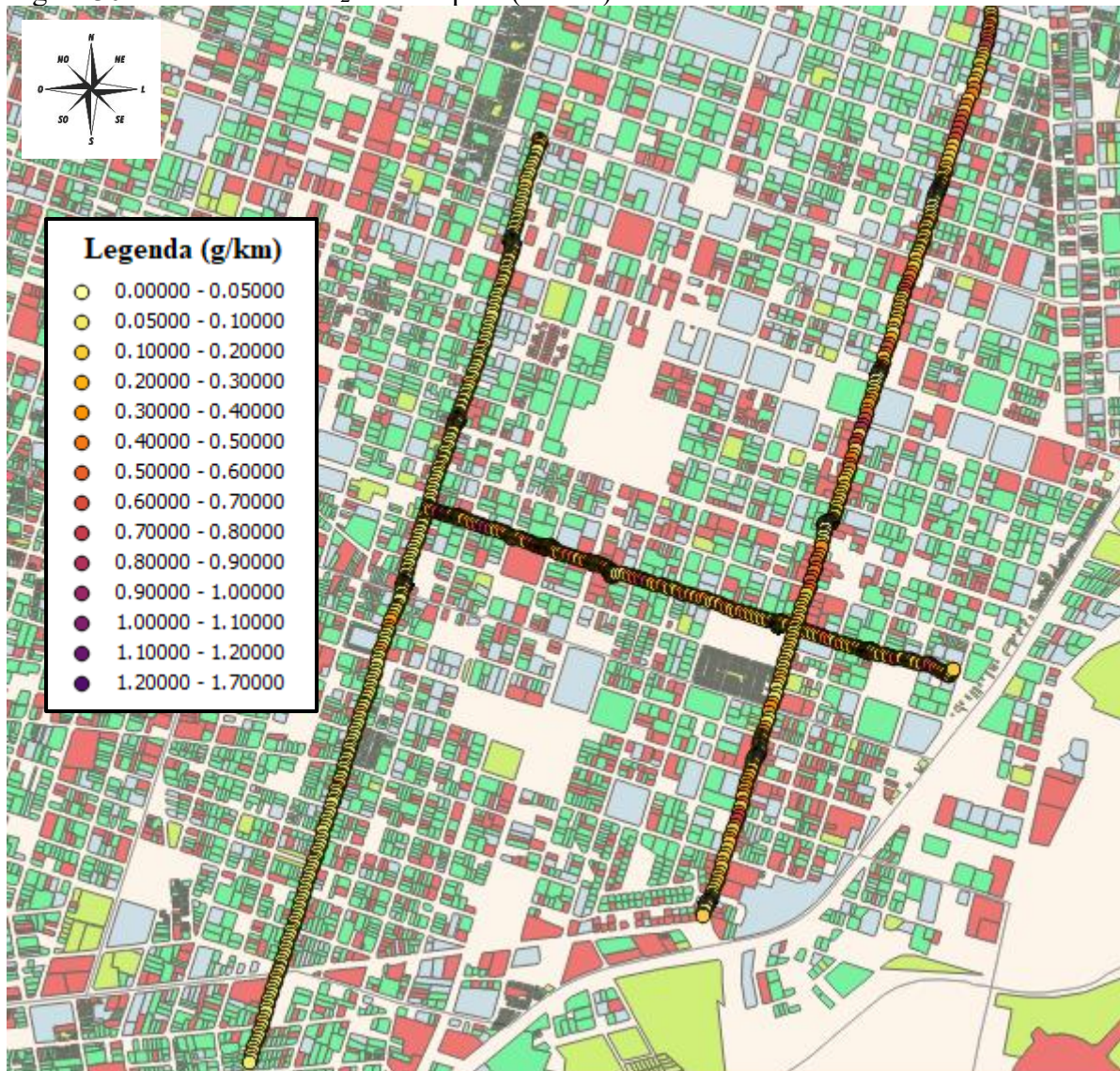
A Figura 29 mostra os resultados de emissão instantânea de CO₂ para a Área 1 durante o horário fora pico para as mesmas amostras de ciclo de condução deste horário apresentadas no item 6.1. Pode-se perceber que o perfil se mantém relativamente constante, com valores geralmente entre 0 e 0,20 g/km, porém, com alguns picos entre 0,30 e 0,90 g/km, próximos a cruzamentos. Isso entra em acordo com o observado nos ciclos de condução, que apresentam um fluxo mais constante para a rua Érico Mota (local – superior transversal) e a av. Jovita Feitosa (coletora – superior diagonal), e a av. 13 de Maio (arterial – inferior transversal) com eventos de *stop-and-go* mais frequentes, que estão de acordo com os resultados de consumo de combustível observados no item anterior.

A Figura 30 mostra os resultados de emissão instantânea de CO₂ para a Área 2 no horário fora pico, relacionados com os ciclos de condução apresentados no item 6.1. Esta região, ao contrário da anterior, é caracterizada por uma maior variação dos níveis de emissão ao longo das vias. A rua Tibúrcio Cavalcante (coletora – esquerda) teve um perfil mais constante, com valores entre 0 e 0,10 g/km. Entretanto, a rua Vicente Linhares (local – meio) e a av. Sen. Virgílio Távora (arterial – direita) apresentaram picos de 1,60 g/km e 0,80 g/km, respectivamente, especialmente próximo a áreas de uso comercial e cruzamentos com vias importantes, porém com valores geralmente entre 0 e 0,30 g/km, que se relacionam com os resultados obtidos para o consumo de combustível nessa região e horário.

Figura 29 – Emissão de CO₂ no fora pico (Área 1)

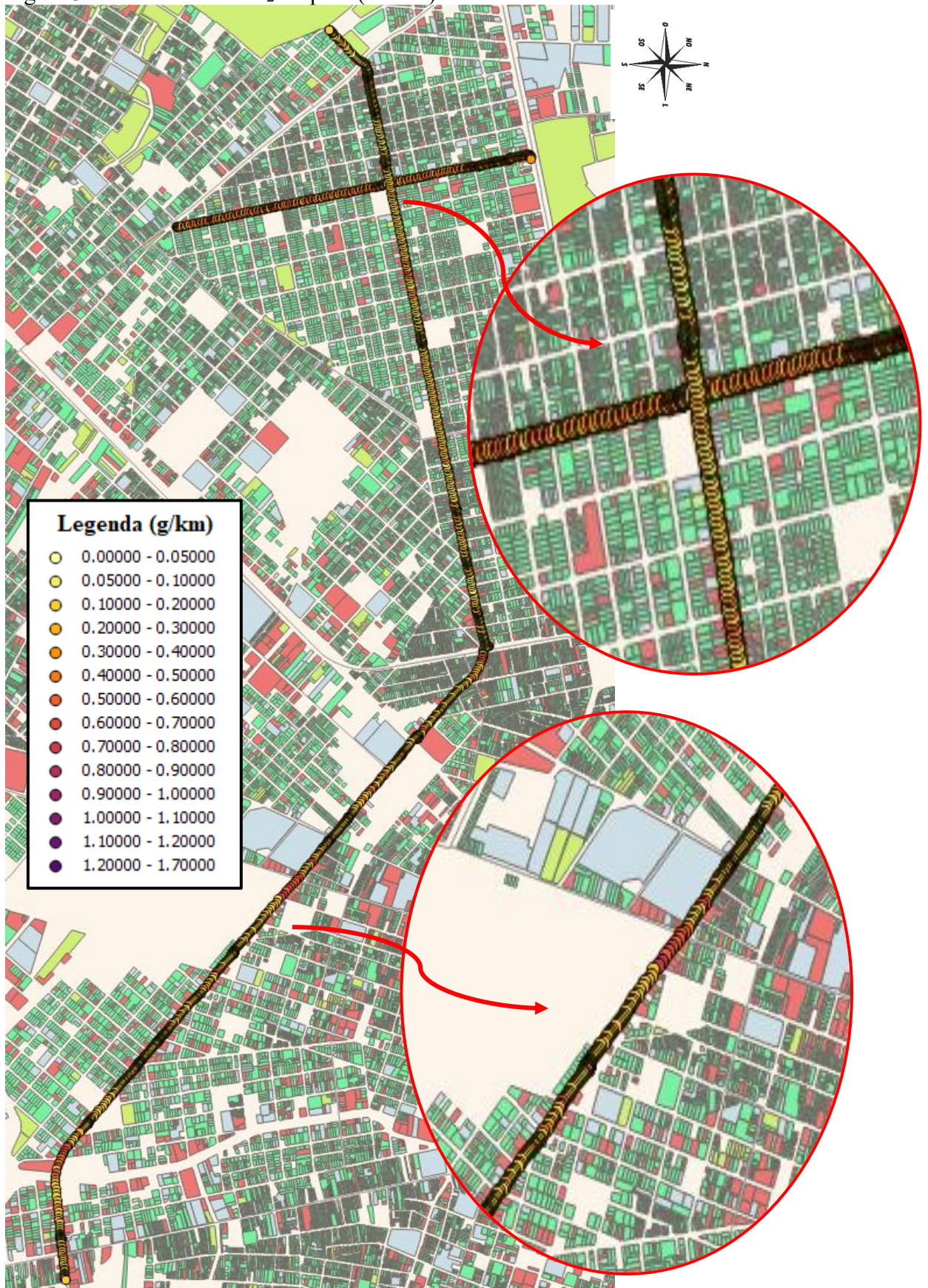
Fonte: Elaborada pela autora (2017)

Figura 30 – Emissão de CO₂ no fora pico (Área 2)



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

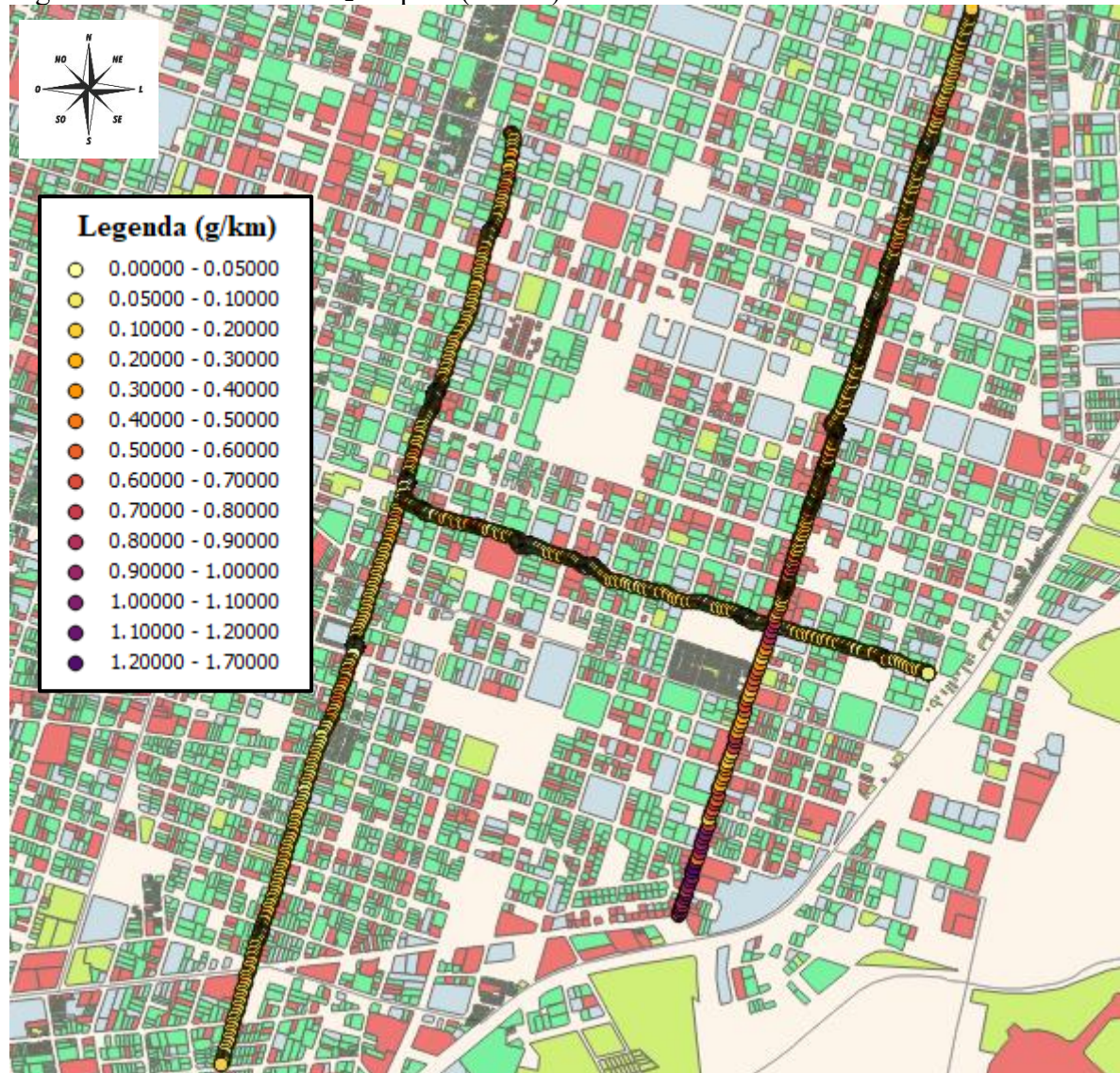
A Figura 31 apresenta os resultados de emissão de CO₂ no horário de pico na Área 1, mais uma vez correlacionados com os ciclos de condução do item 6.1. Neste horário, percebe-se uma alteração de comportamento na rua Érico Mota (local – superior transversal), com valores entre 0,30 e 0,60 g/km. A av. Jovita Feitosa (coletora – diagonal superior) apresentou maior ocorrência de picos, geralmente próximos a cruzamentos semaforizados, entre 0,40 e 0,70 g/km, porém, na maior parte de sua extensão, os valores ficaram entre 0,05 e 0,20 g/km. A av. 13 de Maio (arterial – diagonal inferior) apresentou picos entre 0,50 e 0,90 g/km, especialmente próximo à av. José Jatahy, ao Shopping Benfica, à UFC, ao 23º Batalhão de Caçadores e ao viaduto da Aguanambi. Seu trecho ficou, em geral, com valores entre 0,05 e 0,30 g/km.

Figura 31 – Emissão de CO₂ no pico (Área 1)

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

A Figura 32 traz os dados de emissão de CO₂ instantâneos para a Área 2 em horário pico, relacionados com os ciclos de condução apresentados no item 6.1.

Figura 32 – Emissão de CO₂ no pico (Área 2)



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

É possível perceber, pela figura, um aumento do nível médio de emissão para a rua Tibúrcio Cavalcante, entre 0 e 0,30 g/km. Além disso, há picos mais intensos, atingindo 1,0 g/km, próximos a cruzamentos, como a rua Costa Barros e av. Júlio Ventura; e a lotes de uso comercial. Em oposto ao observado para as outras vias no horário pico, a rua Vicente Linhares apresentou redução dos níveis de emissão, ficando seus valores, em geral, entre 0 e 0,30 g/km, e picos até 0,70 g/km no início da via e nos cruzamentos com a rua Osvaldo Cruz e a av. Desembargador Moreira. Percebe-se, porém, que esses cruzamentos se encontram próximos a lotes comerciais, como a Faculdade Estácio – Moreira Campos e centros

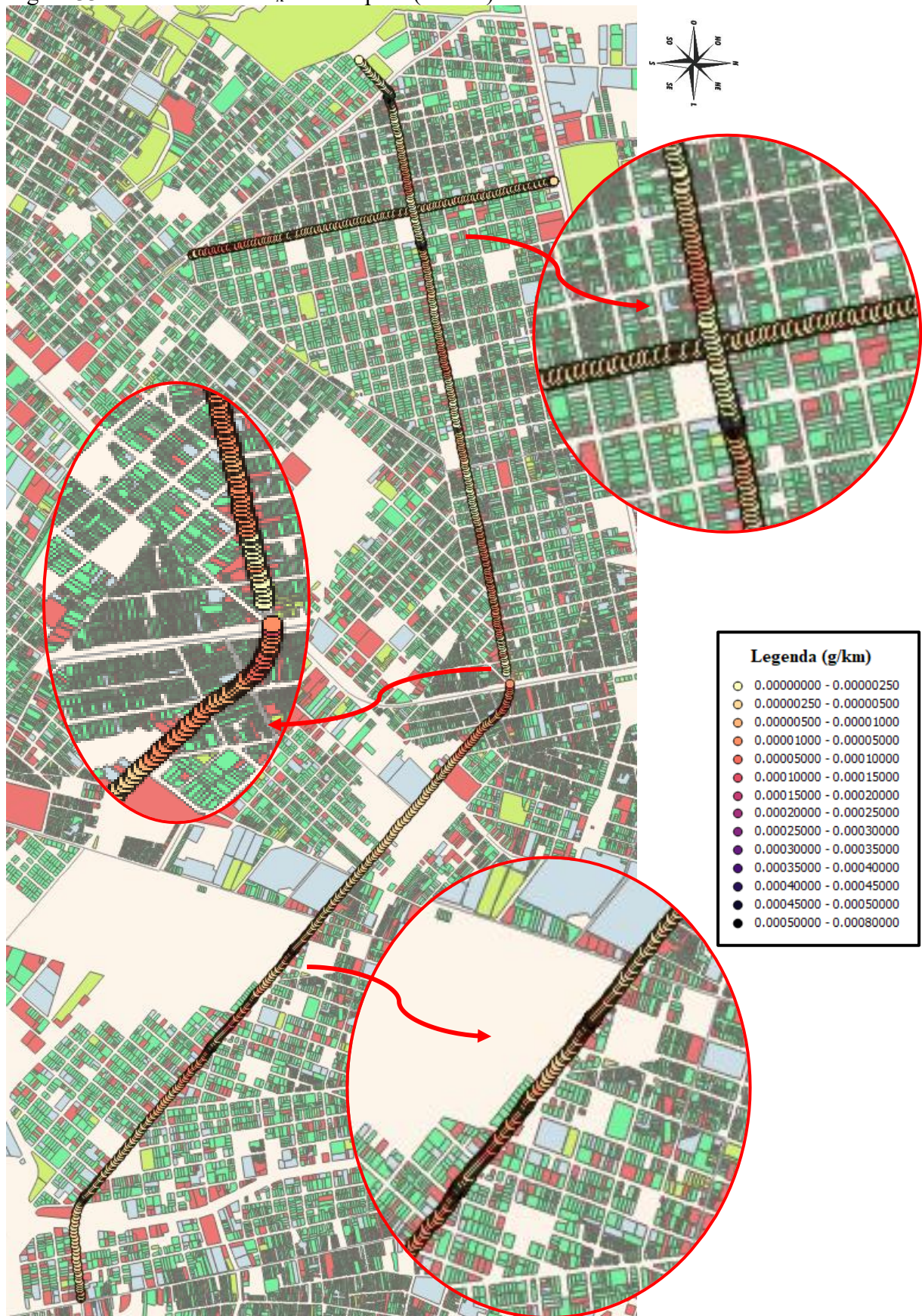
comerciais, respectivamente. A av. Sen. Virgílio Távora apresentou um aumento dos níveis de emissão ao longo do trecho, com valores entre 0,05 e 0,60 g/km. Percebe-se, também, maior incidência de picos e em trechos mais longos, como entre as avenidas Pontes Vieira e Antônio Sales (no sentido ida – Nordeste/Sudeste); e próximo aos cruzamentos com a rua Vicente Linhares, av. Padre Antônio Tomás, av. Santos Dumont, av. Dom Luís e av. Antônio Justa (nos dois sentidos). Observa-se, nessas interseções, presença de lotes com uso comercial e misto, o que tende a gerar eventos de *stop-and-go*.

6.3.3 Óxidos de nitrogênio

A formação de NO_x não é diretamente relacionada à combustão de combustível, estando mais intimamente ligada à temperatura no motor, que fornece energia para o nitrogênio e oxigênio atmosféricos reagirem, conforme mencionado anteriormente. A reação, no entanto, é um pouco atrasada em relação ao aumento de temperatura, pois depende da entrada do ar atmosférico no motor, e pode, ainda, ser influenciada pela temperatura externa. Os Apêndices E e F apresentam a visão geral das duas áreas em relação à emissão de NO_x, nos horários fora pico e pico.

A Figura 33 mostra os resultados instantâneos para emissão de NO_x na Área 1 no horário fora pico, correlacionados com os ciclos de condução do item 6.1. De modo geral, os valores ficaram entre 0 e 0,00001 g/km nas três vias. A rua Érico Mota obteve um pico no início do trecho, atingindo um máximo de 0,00009 g/km, que pode ter sido causado pela marcação do começo da via caracterizada pelo aumento da rotação e possível superaquecimento do motor. Ao longo da rua, entretanto, percebe-se uma constância de valores. A av. Jovita Feitosa apresentou maior frequência de picos de emissão no sentido volta (Nordeste/Sudoeste), atingindo o máximo de 0,00005 g/km. Os picos ocorreram próximos aos cruzamentos, sendo o maior após o cruzamento com a av. José Jatahy. O sentido ida (Sudoeste/Nordeste) apresentou valores menores e mais constantes de emissão, entre 0 e 0,0000025 g/km, com um pico próximo à avenida José Jatahy, chegando a 0,00004 g/km. O sentido ida (Noroeste/Sudeste) da av. 13 de Maio também apresentou valores baixos e constantes, ficando entre 0 e 0,000005 g/km, atingindo um pico de 0,0003 g/km. O sentido volta (Sudeste) apresentou picos mais frequentes e extensos, especialmente próximos ao 23º Batalhão de Caçadores, ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), e entre o Shopping Benfica e a av. José Jatahy, indicando maior ocorrência de *stop-and-go* nesse sentido.

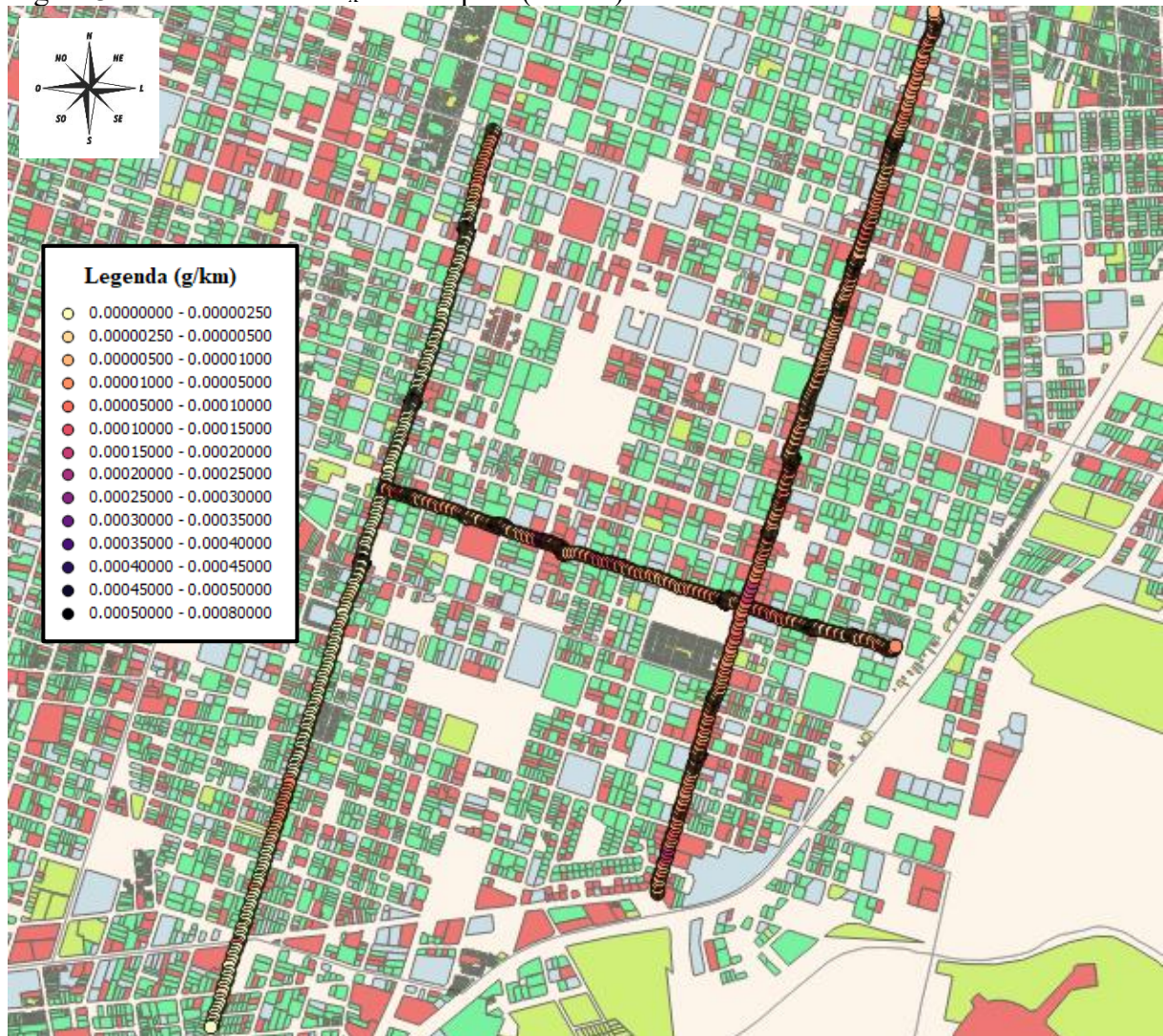
Figura 33 – Emissão de NO_x no fora pico (Área 1)



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

A Figura 34 contém os dados de emissão de NO_x para o horário fora pico na Área 2, relativos aos ciclos de condução exibidos no item 6.1.

Figura 34 – Emissão de NO_x no fora pico (Área 2)



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Observa-se, para a rua Tibúrcio Cavalcante, valores entre 0 e 0,0000025 g/km na maior parte da via, com picos entre o início do trecho e a rua Costa Barros, e entre as ruas Coronel Alves Teixeira e Francisco Holanda, atingindo 0,00005 g/km. A rua Vicente Linhares e a av. Sen. Virgílio Távora apresentaram médias superiores nesse horário, talvez por ter sido o horário fora pico da tarde, quando há temperaturas externas mais altas. A rua Vicente Linhares apresentou valores próximos a 0,000004 e 0,0001 g/km, com os picos se concentrando próximos a cruzamentos e a lotes de uso do comercial, como a Faculdade Estácio Moreira Campos e centros comerciais, atingindo 0,0003 g/km.

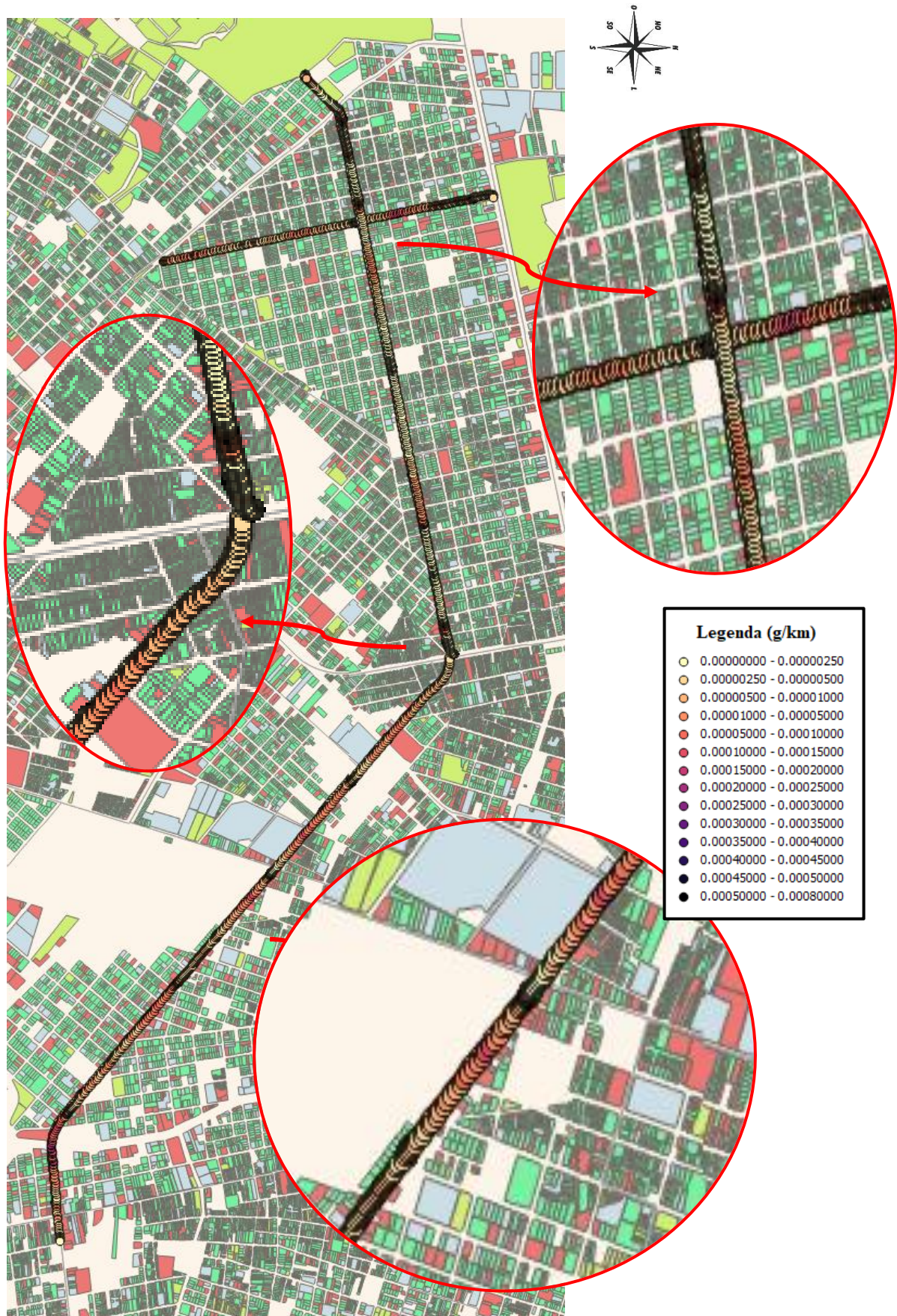
A av. Sen. Virgílio Távora apresentou valores entre 0,000006 e 0,0002 g/km na maior parte do seu trecho, atingindo picos de até 0,0004 g/km nos dois sentidos da via. Os pontos mais críticos se apresentaram próximos aos cruzamentos com a rua Canuto de Aguiar, av. Dom Luís, rua Eduardo Garcia, av. Antônio Sales e av. Pontes Vieira, onde há concentração de atividades comerciais e entrada e saída de veículos de estacionamentos, com o sentido ida apresentando picos maiores e mais frequentes. O adensamento da região, com presença mais intensa de edifícios altos, contribui para elevação da temperatura e dos níveis de emissão nessa área.

A Figura 35 apresenta os resultados de emissão de NO_x instantâneas na Área 1 durante o horário de pico, relacionados aos ciclos de condução apresentados no item 6.1. Percebe-se uma elevação dos níveis de emissão para a rua Érico Mota, que passa a ter alguns picos próximos às interseções, atingindo 0,0002 g/km após o cruzamento com a av. Jovita Feitosa, onde há presença de estabelecimentos comerciais, e conseqüente entrada e saída de veículos de estacionamento.

Para a av. Jovita Feitosa, percebe-se um aumento de intensidade nos picos de emissão, ficando entre 0,00005 e 0,0001 g/km. Ao longo do sentido ida, não há grandes alterações, com os picos ocorrendo, até mesmo, nas mesmas partes da via. No sentido volta, todavia, surgiram alguns pontos de pico próximos a algumas interseções, onde há lotes de uso comercial e misto.

A av. 13 de Maio, no aspecto geral, apresenta aumento dos níveis de emissão ao longo da via, porém seus picos permaneceram em mesma intensidade, entre 0,0001 e 0,0003 g/km. Além disso, em alguns momentos foram obtidos valores inferiores aos do horário fora pico, em trechos onde pode ter havido melhoras no fluxo ou coincidiu com um semáforo verde. O sentido volta permaneceu como mais intenso, sendo seus principais pontos críticos próximos a lotes de uso comercial e misto, como o 23º Batalhão dos Caçadores, o IFCE, a UFC e o Shopping Benfica; e no Viaduto da Aguanambi.

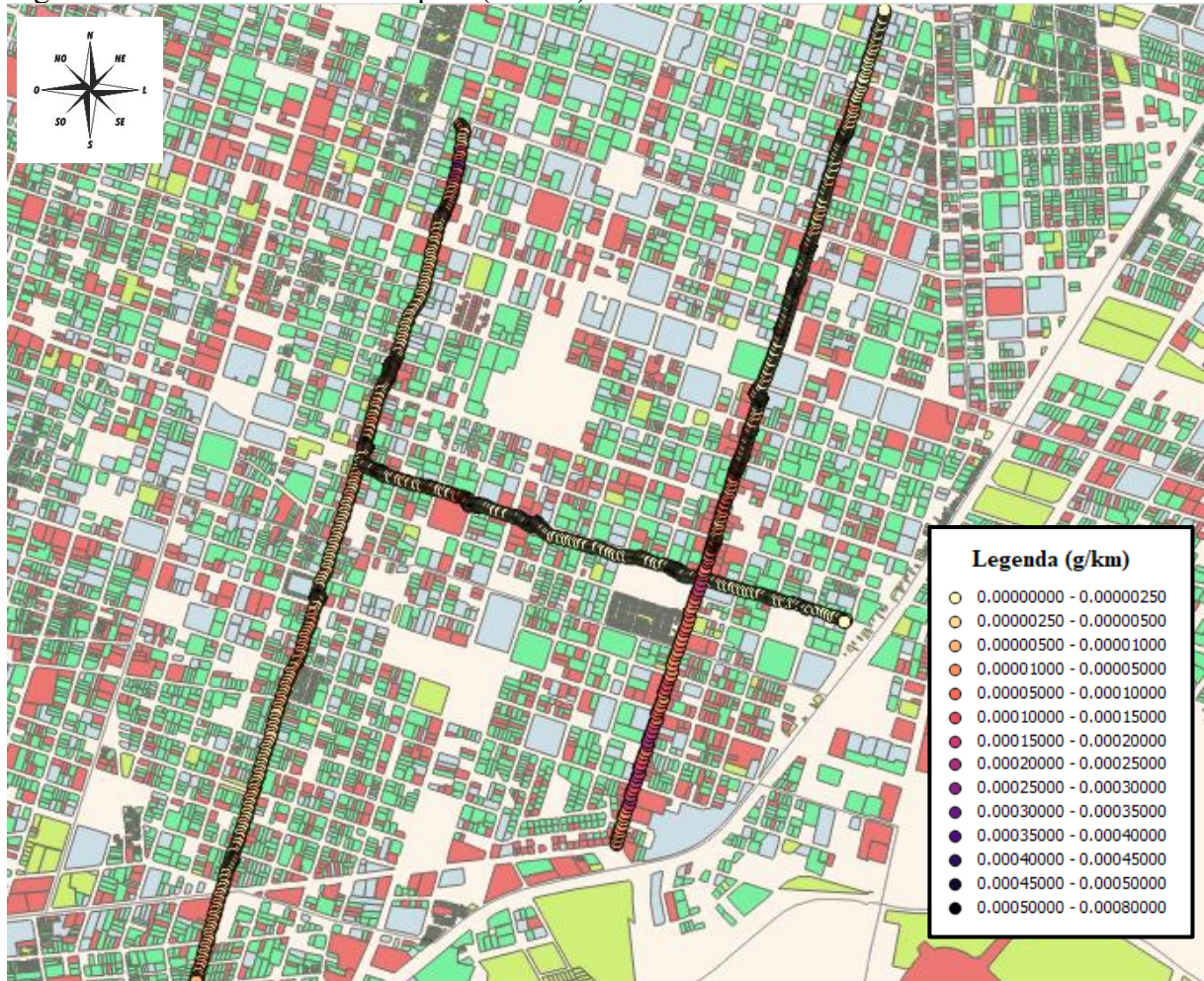
Figura 35 – Emissão de NO_x no pico (Área 1)



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

A Figura 36 traz os dados instantâneos de emissão de NO_x no horário de pico na Área 1, relacionados aos ciclos de condução do item 6.1.

Figura 36 – Emissão de NO_x no pico (Área 2)



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Há um aumento nos níveis de emissão na rua Tibúrcio Cavalcante, com picos próximos à rua Costa Barros, entre as avenidas Padre Antônio Tomás e Júlio Ventura, e próximo à av. Antônio Sales, vias importantes e que atraem grande parte do fluxo desta região, contribuindo para uma maior ocorrência de eventos de *stop-and-go*. A rua Vicente Linhares apresentou redução das emissões, que atingiram um pico de 0,00008 g/km, próximo à Faculdade Estácio, 3,6 vezes menor que no horário anterior, o que pode ser resultado da redução de temperatura ambiente, visto que era o horário de pico da noite. Na maior parte do seu trecho, as emissões ficaram entre 0 e 0,000005 g/km. A av. Sen. Virgílio Távora também apresentou redução no seu nível médio de emissão, entretanto, apresentou um *range* maior, variando entre 0 e 0,0008 g/km, cerca de 4 vezes maior que no horário anterior. Neste horário,

houve inversão entre os sentidos, havendo redução no sentido ida, e intensificação no sentido volta, especialmente em cruzamentos e lotes comerciais.

6.3.4 Avaliação geral

Para a Área 1, tem-se as emissões de CO₂ e consumo constantes e próximos durante o horário fora pico. No horário de pico, no entanto, a rua Érico Mota (local) apresentou expressivas alterações positivas (aumento) nessas duas variáveis. Os resultados das av. Jovita Feitosa (coletora) e av. 13 de Maio (arterial) também obtiveram aumento, além de alterações mais significativas em relação a um dos sentidos da via (ida ou volta). Os máximos de emissão de CO₂ e consumo foram observados, principalmente, próximos a interseções semaforizadas, como com a av. José Jatahy, e lotes de uso comercial ou misto, como o Shopping Benfica, que facilitam a ocorrência de *stop-and-go*. Na Área 2, no horário fora pico, verificou-se níveis mais elevados e dinâmicos de emissão de CO₂ e consumo de combustível para a rua Vicente Linhares (local) e av. Sen. Virgílio Távora (arterial) em comparação com a rua Tibúrcio Cavalcante, que se apresentou mais constante, e com a Área 1. No horário de pico, no entanto, a rua Vicente Linhares apresentou redução dos níveis médios, ao contrário das outras vias, apesar de apresentar picos próximos à Faculdade Estácio. Os máximos dessa área, assim como na Área 1, apresentaram-se mais intensos quando próximo a interseções semaforizadas, em especial com outras vias arteriais, como a av. Ponte Vieira e av. Santos Dumont, e locais com maior incidência de lotes de uso comercial ou misto.

Em relação ao NO_x, verifica-se, na Área 1, aumento de emissões no horário de pico nas vias local e coletora, e redução na via arterial, com máximos geralmente subsequentes a interseções semaforizadas. O primeiro caso pode ser explicado pela maior ocorrência de *stop-and-go* nessas vias, que contribui para aumento da temperatura do motor e consequente formação de NO_x. Na Área 2, observa-se elevados níveis de emissão nas vias local e arterial no horário fora pico, e brusca redução quando no horário de pico, que podem ser oriundos da elevada temperatura ambiente no momento da coleta no horário fora pico. Contudo, na via coletora foi observado um aumento nas emissões, que podem ser provenientes da maior frequência de eventos de *stop-and-go*.

De modo geral, observa-se a influência de lotes de uso comercial ou misto e de interseções semaforizadas na ocorrência de picos de emissão de CO₂ e consumo de combustível. Além disso, observa-se que eventos de *stop-and-go* interferem na emissão de

NO_x, porém a hora do dia apresenta-se com maior impacto nesse fator, devido às temperaturas externas.

6.4 Volume de tráfego

Ao longo do dia, as diversas atividades que se iniciam e se encerram geram variações do fluxo de veículos, que são chamadas de picos (maior fluxo) e fora picos (menor fluxo). Este trabalho considerou os horários de pico sendo de 06:30 às 08:30 e de 17:30 às 19:30, enquanto os horários fora pico como 08:30 às 10:30 e 14:30 às 16:30. Para melhor compreensão dos resultados, as vias foram separadas por área de estudo, e depois agrupadas para uma análise por classificação funcional.

6.4.1 Área 1

A vias que compõem a Área 1 são, conforme já mencionado, a av. 13 de Maio, a av. Jovita Feitosa e a rua Érico Mota. A Tabela 5 apresenta os valores médios de emissão para a av. 13 de Maio no horário fora pico (manhã), incluindo os valores para cada sentido da via.

Tabela 5 – Valores médios de emissão e consumo para a av. 13 de Maio (fora pico)

	CO ₂ (g/km)		NO _x (g/km)		Consumo (L/100km)	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Ida	0,132	0,013	0,00001519	0,0000033	0,0062	0,0006
Volta	0,097	0,012	0,00001070	0,0000042	0,0046	0,0006
Média	0,115	0,022	0,00001295	0,0000042	0,0054	0,0008

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Através da Tabela 5, neste horário, o sentido volta (Sudeste/Noroeste) apresentou média inferior ao sentido ida (Noroeste/Sudeste), de cerca de 26,7% para o CO₂, 29,5% para o NO_x e 26,7% para o consumo.

A Tabela 6 apresenta os valores médios de emissão para a av. 13 de Maio no horário de pico (noite), incluindo os valores para cada sentido da via.

Tabela 6 – Valores médios de emissão e consumo para a av. 13 de Maio (pico)

	CO ₂ (g/km)		NO _x (g/km)		Consumo (L/100km)	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Ida	0,133	0,044	0,00000793	0,0000018	0,0062	0,0021
Volta	0,125	0,017	0,00001300	0,0000037	0,0059	0,0008
Média	0,129	0,027	0,00001047	0,0000038	0,0060	0,0013

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Analisando os resultados obtidos, neste horário, os sentidos de ida e volta apresentaram valores próximos quanto à emissão de CO₂ e ao consumo de combustível, cerca de 6,0% de diferença para os dois parâmetros. O sentido volta, no entanto, apresentou emissão de NO_x superior ao sentido de ida neste horário, com diferença de cerca de 64,0%.

Ao analisar as médias obtidas para os dois horários, obteve-se um aumento de 12,3% na emissão de CO₂ e no consumo, e uma redução de 19,1% na emissão de NO_x. Realizando o teste de hipóteses, com um intervalo de confiança de 95%, não foram encontradas evidências necessárias significativas para rejeitar a hipótese nula (igualdade entre as médias). Assim, conclui-se que não existem diferenças significativas entre os dois horários em relação à emissão desses poluentes e ao consumo de combustível.

A Tabela 7 apresenta os valores médios de emissão para a av. Jovita Feitosa no horário fora pico (manhã), incluindo os valores para cada sentido da via.

Tabela 7 – Valores médios de emissão e consumo para a av. Jovita Feitosa (fora pico)

	CO ₂ (g/km)		NO _x (g/km)		Consumo (L/100km)	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Ida	0,097	0,015	0,00000273	0,0000024	0,0046	0,0007
Volta	0,086	0,003	0,00000661	0,0000000	0,0040	0,0002
Média	0,092	0,011	0,00000467	0,0000026	0,0043	0,0005

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

O sentido volta (Nordeste/Sudoeste), para o horário fora pico, apresentou média inferior em 11,6% nas emissões de CO₂ e no consumo de combustível, e média 145,9% superior nas emissões de NO_x.

A Tabela 8 apresenta os valores médios de emissão para a av. Jovita Feitosa no horário de pico (noite), incluindo os valores para cada sentido da via.

Tabela 8 – Valores médios de emissão e consumo para a av. Jovita Feitosa (pico)

	CO ₂ (g/km)		NO _x (g/km)		Consumo (L/100km)	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Ida	0,111	0,010	0,00000299	0,0000017	0,0052	0,0005
Volta	0,162	0,027	0,00000957	0,0000026	0,0076	0,0013
Média	0,136	0,033	0,00000628	0,0000041	0,0064	0,0016

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

O sentido volta apresentou média superior para os três parâmetros no horário de pico, cerca de 45,8% nas emissões de CO₂ e no consumo de combustível, e de 219,8% nas emissões de NO_x.

Analisando os resultados médios dos dois horários, verifica-se um aumento de 49,1% tanto na emissão de CO₂ quanto no consumo de combustível, e de 35,1% na emissão de NO_x. Fazendo o teste de hipóteses, com um intervalo 95% de confiança, não foram encontrados indícios suficientes para rejeitar a hipótese nula (igualdade entre as médias), o que indica não haver diferenças expressivas entre os dois horários.

A Tabela 9 apresenta os valores médios de emissão para a rua Érico Mota nos horários fora pico (manhã) e pico (noite).

Tabela 9 – Valores médios de emissão e consumo para a rua Érico Mota

	CO ₂ (g/km)		NO _x (g/km)		Consumo (L/100km)	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Fora pico	0,121	0,017	0,00000861	0,0000015	0,0057	0,0008
Pico	0,347	0,056	0,00001182	0,0000061	0,0163	0,0026
Média	0,234	0,129	0,00001022	0,0000044	0,0110	0,0060

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Observa-se, através dos resultados da Tabela 9, um aumento nas emissões e no consumo durante o horário de pico, com 185,5% para o CO₂, 37,3% para o NO_x e 185,5% para o consumo. Ao fazer o teste de hipóteses, com um intervalo de 95% de confiança, encontraram-se indícios satisfatórios para rejeitar a hipótese nula (igualdade entre as médias) para a emissão de CO₂ e o consumo de combustível, sugerindo haver alterações significativas entre os dois horários no perfil de comportamento desses parâmetros.

Foram feitos, ainda, testes de hipóteses, com um intervalo de confiança de 95% e hipótese nula de igualdade entre as médias, entre os resultados médios dos horários fora pico e pico, e médias gerais entre todas as vias. O resultado é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultado do teste de hipóteses para a Área 1

		CO ₂	NO _x	Consumo
13 de Maio/Jovita Feitosa	Fora pico	Aceita	Rejeita	Aceita
	Pico	Aceita	Aceita	Aceita
	Média	Aceita	Rejeita	Aceita
13 de Maio/Érico Mota	Fora pico	Aceita	Aceita	Aceita
	Pico	Rejeita	Aceita	Rejeita
	Média	Aceita	Aceita	Aceita
Jovita Feitosa/Érico Mota	Fora pico	Aceita	Aceita	Aceita
	Pico	Rejeita	Aceita	Rejeita
	Média	Aceita	Aceita	Aceita

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Como pode ser observado, o teste encontrou indicativos suficientes para rejeitar a hipótese nula para a emissão de NO_x entre avenidas 13 de Maio e Jovita Feitosa quando no horário fora pico e na média geral, o que mostra haver diferenças consideráveis no comportamento entre essas vias no horário fora pico e no aspecto geral em relação à emissão desse poluente, enquanto o comportamento é semelhante nos outros aspectos. Além disso, o teste rejeitou a hipótese nula para a emissão de CO₂ e o consumo de combustível no horário de pico comparando a rua Érico Mota com as outras duas vias, indicando que essa via apresenta comportamento diferente em relação a esses parâmetros no horário pico.

O fato do teste não ter rejeitado a hipótese nula em nenhum dos resultados do horário fora pico para a emissão de CO₂ e o consumo de combustível é esperado, visto que durante esse horário é possível trafegar próximo ao limite de velocidade da via e há menos impedâncias que afetem esses dois parâmetros. O NO_x, no entanto, possui comportamento diferente, sendo mais afetado pela temperatura do motor. A diferença encontrada para a rua Érico Mota, no aspecto de emissão de CO₂ e consumo, condiz com sua condição de via local, enquanto a semelhança entre as avenidas 13 de Maio e Jovita Feitosa indicam que talvez a classificação viária desta já não seja condizente com sua situação atual de tráfego. Por fim, verifica-se que a classificação viária não impõe diferenças expressivas quando uma avaliação geral, agrupando os horários de pico e fora pico, é feita para nesta área.

6.4.2 Área 2

A vias que compõem a Área 1 são, conforme anteriormente mencionado, a av. Senador Virgílio Távora, a rua Tibúrcio Cavalcante e a rua Vicente Linhares. A Tabela 11

apresenta os valores médios de emissão para a av. Sen. Virgílio Távora no horário fora pico (tarde), incluindo os valores para cada sentido da via.

Tabela 11 – Valores médios de emissão e consumo para av. Sen. Virgílio Távora (fora pico)

	CO ₂ (g/km)		NO _x (g/km)		Consumo (L/100km)	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Ida	0,157	0,055	0,00004920	0,0000365	0,0074	0,0026
Volta	0,139	0,016	0,00001929	0,0000093	0,0065	0,0007
Média	0,148	0,038	0,00003424	0,0000289	0,0069	0,0018

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Pela Tabela 11, observa-se que o sentido de ida (Nordeste/Sudoeste) da via apresenta uma média maior nos três parâmetros neste horário, com uma diferença de 13,5% para CO₂, 155,0% para NO_x e 13,5% para o consumo de combustível, e também maiores desvios padrões.

A Tabela 12 apresenta os valores médios de emissão para a av. Sen. Virgílio Távora no horário de pico (noite), nos dois sentidos da via.

Tabela 12 – Valores médios de emissão e consumo para a av. Sen. Virgílio Távora (pico)

	CO ₂ (g/km)		NO _x (g/km)		Consumo (L/100km)	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Ida	0,197	0,072	0,00001354	0,0000013	0,0092	0,0034
Volta	0,146	0,064	0,00001490	0,0000069	0,0069	0,0030
Média	0,172	0,067	0,00001422	0,0000045	0,0081	0,0031

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Neste horário, como pode ser observado, as diferenças entre os sentidos de ida e volta na emissão de CO₂ e no consumo aumentam para 34,4%, enquanto a emissão de NO_x inverte-se e apresenta maior média no sentido de volta, com uma diferença de 9,1%.

Ao analisar as médias para os dois horários, verifica-se um aumento de 16,1% na emissão de CO₂ e no consumo de combustível durante o horário de pico, enquanto as emissões de NO_x apresentam uma redução de 58,5%. Realizando o teste de hipóteses, com um intervalo de confiança de 95%, não foram obtidos indícios suficientes para rejeitar a hipótese nula (igualdade entre as médias) para nenhum dos parâmetros, o que demonstra não haver diferenças significativas entre os dois horários. A médias de emissão de NO_x para o horário fora pico (tarde) pode ser explicado pelas altas temperaturas externas no momento da coleta, visto que esse poluente se relaciona diretamente com o aumento da temperatura. Enquanto o

aumento das emissões de CO₂ e do consumo de combustível para o horário de pico podem ser explicados pelo aumento do fluxo de veículos nesse horário.

A Tabela 13 apresenta os valores médios de emissão e consumo para a rua Tibúrcio Cavalcante, no horário for pico (manhã) e pico (manhã).

Tabela 13 – Valores médios de emissão e consumo para a rua Tibúrcio Cavalcante

	CO ₂ (g/km)		NO _x (g/km)		Consumo (L/100km)	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Fora pico	0,077	0,009	0,00000593	0,0000035	0,0036	0,0004
Pico	0,116	0,026	0,00000815	0,0000009	0,0054	0,0012
Média	0,097	0,028	0,00000704	0,0000026	0,0057	0,0013

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Percebe-se, através da análise dos valores da tabela anterior, que há aumento de 50,1% nas emissões de CO₂ e no consumo de combustível, e de 37,4% nas emissões de NO_x. O teste de hipóteses, no entanto, não apresentou indícios suficientes para rejeitar a hipótese nula (igualdade de médias), dentro de um intervalo de 95% de confiança. Isso indica que o comportamento dos veículos não se altera significativamente entre esses horários.

A Tabela 14 apresenta os valores médios de emissão e consumo para a rua Vicente Linhares nos horários fora pico (tarde) e pico (noite).

Tabela 14 – Valores médios de emissão e consumo para a rua Vicente Linhares

	CO ₂ (g/km)		NO _x (g/km)		Consumo (L/100km)	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Fora pico	0,198	0,080	0,00001546	0,0000083	0,0093	0,0038
Pico	0,128	0,022	0,00000479	0,0000010	0,0060	0,0010
Média	0,156	0,058	0,00000906	0,0000072	0,0073	0,0027

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Para a rua Vicente Linhares, o horário de pico apresentou redução nas emissões e no consumo, com diferença de 35,5% para o CO₂ e o consumo, e 69,0% para o NO_x. O teste de hipóteses, no entanto, dentro de um intervalo de confiança de 95%, não ofereceu indícios para rejeitar a hipótese nula (igualdade das médias), significando não haver mudanças expressivas de comportamento entre os dois horários.

Foram realizados, em complemento, testes de hipóteses, com um intervalo de confiança de 95% e hipótese nula de igualdade entre as médias, entre os resultados médios

dos horários fora pico e pico, e médias gerais entre todas as vias da Área 2. O resultado é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultado do teste de hipóteses para a Área 2

		CO ₂	NO _x	Consumo
Virgílio Távora/Tibúrcio Cavalcante	Fora pico	Rejeita	Aceita	Rejeita
	Pico	Aceita	Aceita	Aceita
	Média	Rejeita	Rejeita	Aceita
Virgílio Távora/Vicente Linhares	Fora pico	Aceita	Aceita	Aceita
	Pico	Aceita	Rejeita	Aceita
	Média	Aceita	Aceita	Aceita
Tibúrcio Cavalcante/Vicente Linhares	Fora pico	Aceita	Aceita	Aceita
	Pico	Aceita	Rejeita	Aceita
	Média	Aceita	Aceita	Aceita

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Percebe-se que o teste forneceu indícios para rejeitar a hipótese nula entre av. Sen. Virgílio Távora e a rua Tibúrcio Cavalcante no horário fora pico para a emissão de CO₂ e o consumo de combustível, e nos valores médios para as emissões de CO₂ e de NO_x. Isso indica que essas vias possuem comportamentos consideravelmente diferentes em relação a esses parâmetros quando no horário fora pico, e nas emissões gerais. Vale ressaltar, no entanto, que os horários de pico e fora pico para as duas vias foram diferentes, sendo tarde e noite, respectivamente, para a av. Sen. Virgílio Távora, e manhã para a rua Tibúrcio Cavalcante, o que pode ser um dos fatores que influenciaram nesses resultados. Comparando via local e coletora e via local e arterial, para a emissão de CO₂ e o consumo de combustível, o teste de hipóteses não rejeitou a hipótese nula em nenhuma das situações, indicando que essas vias não possuem diferenças expressivas quando em horário de pico ou fora pico, e ainda em sua emissão e consumo médios. Além disso, o teste ofereceu indícios para rejeitar a hipótese nula para a emissão de NO_x entre a rua Vicente Linhares e as outras vias no horário de pico, indicando que essa via possui características significativamente diferentes para a emissão deste poluente neste horário.

6.4.3 Classificação funcional

Nesta seção, as vias foram comparadas em relação à sua classificação viária, de modo a fornecer uma visão acerca das diferenças e semelhanças quando da função da via. A

Tabela 16 apresenta os valores médios de emissão para as vias de classificação arterial, av. 13 de Maio e av. Sen. Virgílio Távora.

Tabela 16 – Vias arteriais

		CO ₂ (g/km)		NO _x (g/km)		Consumo (L/100km)	
		Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
13 de Maio (Área 1)	Fora pico	0,115	0,022	0,0000129	0,0000042	0,0054	0,0008
	Pico	0,129	0,027	0,0000105	0,0000038	0,0060	0,0013
	Média	0,120	0,024	0,0000120	0,0000040	0,0056	0,0011
Virgílio Távora (Área 2)	Fora pico	0,148	0,038	0,0000342	0,0000289	0,0069	0,0018
	Pico	0,172	0,067	0,0000142	0,0000045	0,0081	0,0031
	Média	0,160	0,053	0,0000242	0,0000223	0,0075	0,0025
MÉDIA		0,142	0,046	0,0000187	0,0000175	0,0067	0,0022

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Ao comparar os horários fora pico das duas vias, percebe-se uma média 28,8% maior em relação à emissão de CO₂ e ao consumo, e 164,5% maior em relação à emissão de NO_x, para a av. Sen. Virgílio Távora. No horário de pico, essa diferença sobe para 33,2% tanto para o CO₂ quanto para o consumo, porém reduz para 35,8% para o NO_x. Desta forma, percebe-se um padrão de consumo e emissão superiores para a av. Sen. Virgílio Távora, com diferenças médias de 32,7% para CO₂, 102,7% para NO_x e 32,7% para o consumo. Ao realizar o teste de hipóteses, com 95% de confiança, não foram encontrados indícios suficientes para rejeitar a hipótese nula (igualdade das médias) ao comparar os horários de pico e fora pico, separadamente, porém foram encontrados indícios ao comparar a média geral.

A Tabela 17 apresenta os resultados para as vias de classificação coletora, av. Jovita Feitosa e rua Tibúrcio Cavalcante.

Tabela 17 – Vias coletoras

		CO ₂ (g/km)		NO _x (g/km)		Consumo (L/100km)	
		Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Jovita Feitosa (Área 1)	Fora pico	0,091	0,011	0,00000465	0,00000267	0,0043	0,0005
	Pico	0,136	0,033	0,00000628	0,00000412	0,0064	0,0016
	Média	0,118	0,035	0,00000563	0,00000401	0,0056	0,0016
Tibúrcio Cavalcante (Área 2)	Fora pico	0,077	0,009	0,00000593	0,00000352	0,0036	0,0004
	Pico	0,116	0,026	0,00000815	0,00000086	0,0054	0,0012
	Média	0,097	0,028	0,00000704	0,00000259	0,0057	0,0013
MÉDIA		0,110	0,033	0,00000616	0,00000320	0,0052	0,0015

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Através dos resultados observados na tabela anterior, a rua Tibúrcio Cavalcante possui média menor em 15,5% e 15,0% tanto na emissão de CO₂ quanto no consumo de combustível, no horário fora pico e pico, respectivamente; e média maior em 27,5% e 29,7% para a emissão de NO_x, no mesmo horários. A média de emissões de CO₂ na rua Tibúrcio Cavalcante se mantém inferior, com uma diferença de 18,4 %. Em contrapartida, as emissões médias de NO_x e o consumo são inferiores na av. Jovita Feitosa, com uma diferença de 25,0% e 3,0%, respectivamente. Realizando o teste de hipóteses, com um intervalo de confiança de 95%, não foram encontrados indícios suficientes para rejeitar a hipótese nula (igualdade das médias) entre os horários pico e fora pico das vias, nem em seus valores médios, o que indica não haver mudanças significativas de comportamento entre essas vias.

A Tabela 18 apresenta os resultados para as vias de classificação local, rua Érico Mota e rua Vicente Linhares.

Tabela 18 – Vias locais

		CO ₂ (g/km)		NO _x (g/km)		Consumo (L/100km)	
		Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Érico Mota (Área 1)	Fora pico	0,121	0,017	0,00000861	0,0000015	0,0057	0,0008
	Pico	0,347	0,056	0,00001182	0,0000061	0,0163	0,0026
	Média	0,234	0,129	0,00001022	0,0000044	0,0110	0,0060
Vicente Linhares (Área 2)	Fora pico	0,198	0,080	0,00001546	0,0000083	0,0093	0,0038
	Pico	0,128	0,022	0,00000479	0,0000010	0,0060	0,0010
	Média	0,156	0,058	0,00000906	0,0000072	0,0073	0,0027
MÉDIA		0,198	0,106	0,00000969	0,0000055	0,0093	0,0050

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Para as vias locais, percebe-se uma média superior no horário fora pico para a rua Vicente Linhares, com diferenças de 63,0% para o CO₂, 79,6% para o NO_x e 63,0% para o consumo. No horário de pico, a situação se inverte, com a rua Érico Mota apresentando médias superiores em 63,2%, 59,5% e 63,2% para os mesmos parâmetros, respectivamente. Em relação às emissões médias, obtém-se valores inferiores para a rua Vicente Linhares, novamente, com variação de 33,5%, 11,3% e 33,5% para CO₂, NO_x e consumo, respectivamente. Realizando o teste de hipóteses para os diferentes horários das vias, em um intervalo de 95% de confiança, foram encontradas evidências satisfatórias para rejeitar a hipótese nula (igualdade das médias) para o horário de pico, sugerindo que essas vias possuem comportamentos notadamente diferentes nesse horário, enquanto o mesmo não se aplicou para o outro horário, nem para os valores médios.

Analisando as médias totais, tem-se que, em relação à emissão de CO₂, as locais emitem mais, seguidas das arteriais e coletoras, com uma diferença de 80,0% das locais e 28,7% das arteriais em relação às vias coletoras. O mesmo resultado foi obtido para o consumo de combustível. Para a emissão de NO_x, no entanto, as vias arteriais ficaram em primeiro lugar, com as vias locais e coletoras respectivamente. Para esse parâmetro, a diferença entre arteriais e coletoras foi de 203,9%, enquanto entre locais e coletoras foi de 57,3%.

A Tabela 19 apresenta os resultados dos testes de hipóteses realizados, levando em consideração as médias do horário fora pico, pico e médias totais, das vias arteriais, coletoras e locais, dentro de um intervalo de 95% de confiança e hipótese nula de igualdade das médias.

Tabela 19 – Teste de hipóteses para as diferentes classificações funcionais

		CO ₂	NO _x	Consumo
Fora pico	Arterial/Coletora	Rejeita	Rejeita	Rejeita
	Coletora/Local	Aceita	Aceita	Aceita
	Arterial/Local	Aceita	Aceita	Aceita
Pico	Arterial/Coletora	Aceita	Rejeita	Aceita
	Coletora/Local	Aceita	Aceita	Aceita
	Arterial/Local	Aceita	Aceita	Aceita
Média	Arterial/Coletora	Aceita	Rejeita	Rejeita
	Coletora/Local	Rejeita	Aceita	Rejeita
	Arterial/Local	Aceita	Aceita	Aceita

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Analisando a Tabela 19, para o horário fora pico, verifica-se que o teste de hipóteses rejeita a hipótese nula ao comparar as médias dos três parâmetros entre as vias arteriais e coletoras, indicando haver diferenças nos comportamentos desses tipos de via. Entretanto, o mesmo resultado não foi obtido ao comparar as vias locais com as outras classificações. Esse resultado pode ser relacionado com o fato de a rua Vicente Linhares (via local – Área 2) ter apresentado diversas ocorrências de *stop-and-go* neste horário, destoando a média e aproximando para algo esperado para vias arteriais e coletoras. No horário de pico, no entanto, o teste de hipóteses rejeitou a hipótese nula apenas para a emissão de NO_x entre as vias coletoras e arteriais, assim como no horário fora pico, indicando que as vias, de modo geral, apresentam comportamento semelhante neste horário, excluindo esse parâmetro. Isso ocorre porque o NO_x não se relaciona diretamente com a combustão, tendo maior relação com a temperatura.

Em relação à comparação das médias totais, o teste rejeitou a hipótese nula entre as vias arteriais e coletoras para NO_x e consumo de combustível, e entre as vias coletoras e locais para CO_2 e consumo. Ao analisar os ciclos de condução, percebe-se que as ruas Tibúrcio Cavalcante e Vicente Linhares não apresentaram grandes alterações quando no horário fora pico ou pico, a primeira permanecendo em fluxo próximo ao livre durante o horário de pico, trazendo a média das coletoras para baixo; e a segunda com fluxo intenso nos dois horários, elevando a média das locais. No primeiro caso, isso faz a média das coletoras se afastar das outras vias, alterando o comportamento de consumo e emissão o suficiente para ser rejeitado pelo teste de hipóteses. No segundo caso, enquanto afasta ainda mais a média entre locais e coletoras, aproxima à média das vias arteriais, não fornecendo indícios para o teste de hipóteses rejeitar a hipótese nula neste caso.

Fazendo uma análise geral, verifica-se que uma análise agregada (vias de mesma classificação ou regiões diferentes) pode não fornecer resultados muito precisos quanto ao comportamento das vias, pois desconsidera características das áreas que podem afetar as emissões e o consumo de combustível. Uma análise por região e classificação, no entanto, apresenta resultados que melhor refletem o perfil característico de cada via. Ao contrário do encontrado por Zhang, Matsushima e Kobayashi (2017), as vias locais exibiram níveis de emissão de CO_2 e consumo superior às outras vias, seguidas das arteriais e coletoras. Uma das explicações pode ser em relação à classificação das vias que, apesar de terem o mesmo nome, podem ter características diferentes; além disso, as dinâmicas de tráfego das duas cidades são diferentes, o que afeta diretamente o perfil de consumo e emissão. Em relação à emissão de NO_x , as vias arteriais manifestaram níveis expressivamente superiores, seguidas das locais e coletoras. Ao realizar o teste de hipóteses, no entanto, não foram confirmadas diferenças significativas de comportamento das vias, confirmando que análises agregadas podem não ser muito precisas. Ainda, as coletas foram realizadas em horários de pico e fora pico ao longo do dia diferentes, definidos a partir da observação dos carregamentos usuais de cada região, o que pode ter afetado a análise.

6.5 Limites de emissão

O veículo utilizado para as coletas encontra-se na categoria de veículos leves, e foi certificado de acordo com a fase L6 do PROCONVE, que estabelece limites de emissão para alguns poluentes, dentre eles o NO_x . O limite para esse poluente é 0,08 g/km (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2009) e, durante a análise, em nenhum

momento este valor foi alcançado, sendo 0,00076 g/km o maior valor atingido. Há, portanto, uma diferença de 104% entre o limite estabelecido e o valor máximo coletado. Ao comparar com o limite da norma europeia Euro 6 (0,06 g/km) (THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION, 2016), obtém-se uma diferença de 78%. Percebe-se, assim, que os valores estabelecidos não condizem com a situação encontrada em campo, sendo muito permissivos.

Além disto, o CO₂ não é incluído nos limites de emissão por não ser, muitas vezes, considerado poluente e, sim, produto da combustão e componente natural do ar atmosférico. Nos últimos anos, entretanto, os níveis usuais de CO₂ na atmosfera têm atingido níveis recordes e previsão de expansão (OMM, 2017). A Resolução nº 415 do CONAMA, que dispõe sobre a fase PROCONVE L6, reconhece a necessidade de “aprimorar o conhecimento sobre a emissão de dióxido de carbono” apenas para motores ciclo Diesel, desconsiderando a contribuição dos motores ciclo Otto para a emissão do mesmo (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2009).

7 CONCLUSÃO

A emissão veicular de poluentes é um assunto que vem sendo abordado por diversas linhas de pesquisa na área de transportes como forma de mitigar seus efeitos na atmosfera e, conseqüentemente, na qualidade de vida das pessoas e no meio ambiente. Muitos foram os estudos que buscaram correlacionar os principais influenciadores do meio urbano na dinâmica do veículo e em suas emissões. Grande parte dos trabalhos internacionais foram baseados em simulações computacionais, com base em bancos de dados de fatores de emissão obtidos em laboratório. No Brasil, essa linha de pesquisa é recente, e, ainda, bancos de dados com fatores de emissão específicos de cada cidade são inexistentes.

O presente trabalho propôs avaliar a relação existente entre consumo de combustível e emissão de poluentes de veículos *flex fuel* em vias urbanas com diferentes classificações funcionais na cidade de Fortaleza-CE, através de coletas *on-board*, ou seja, obtendo dados dinâmicos reais.

Para tal, buscou-se encontrar a relação entre classificação funcional e adensamento urbano no perfil de consumo de combustível e emissão de poluentes ao comparar duas áreas com situações de adensamento distintas. Foram encontradas diferenças significativas nas emissões de CO₂ e consumo de combustível entre horário de pico e fora pico apenas na Área 1 (menos adensada), não encontrando o mesmo resultado para o NO_x nesta região. Para a Área 2 (mais adensada), não foi possível confirmar a hipótese de diferenças entre os dois horários, sugerindo que o aumento do adensamento contribui para uma constância de emissões e consumo ao longo do dia em regiões mais adensadas. No entanto, não foram encontradas evidências significativas que corroborem para consideração do adensamento como parâmetro sensível o suficiente para comparar consumo de combustível e emissão de poluentes em regiões de diferentes graus de adensamento, com as duas áreas apresentando perfil geral de consumo e emissão semelhantes.

Procurou-se, também, correlacionar o perfil de consumo e emissão com o padrão de uso do solo. De modo geral, observou-se a influência de lotes de uso comercial ou misto e de interseções semaforizadas na ocorrência de picos de emissão de CO₂ e consumo de combustível. Ainda, verificou-se que eventos de *stop-and-go* interferem na emissão de NO_x, porém a hora do dia apresenta-se com maior impacto nesse fator, devido às temperaturas externas.

Por fim, buscou-se encontrar o efeito da variação do volume de tráfego ao longo do dia, considerando horários de pico e fora pico. Vias arteriais revelaram sofrer pouca

influência quanto ao horário do dia, mantendo valores médios próximos nos dois horários, porém, com intensificação em um dos sentidos (ida ou volta). Ademais, vias locais e coletoras apresentaram maior variação nos perfis de consumo e emissão ao longo do dia, entretanto com comportamentos variados a depender da região. Contudo, o teste de hipóteses comparando as médias de cada grupo (arterial, coletora, local), com intervalo de 95% de confiança, não revelou diferenças significativas na maior parte das análises. As coletas foram realizadas em horários de pico e fora pico diferentes, o que pode ter afetado a análise.

Conclui-se, por fim, que uma análise agregada (agrupando vias de mesma classificação funcional ou regiões diferentes) pode não fornecer sensibilidade suficiente quanto ao comportamento das vias, pois desconsidera características da região e do entorno da via que podem afetar o consumo de combustível e a emissão de poluentes. Uma análise por região e classificação, no entanto, apresenta resultados que melhor refletem o perfil característico de cada hierarquia viária.

Para trabalhos futuros, sugere-se a extensão das análises para outras regiões da cidade; em veículos de diferentes motorizações; com outros tipos de combustível, ou proporções de mistura de combustível; também seria importante uma avaliação quanto ao perfil dos condutores. Acredita-se que, assim, conclusões mais generalistas poderão ser obtidas.

REFERÊNCIAS

- ABRANTES, R. DE; ASSUNÇÃO, J. V. DE; HIRAIA, E. Y. Caracterização das emissões de aldeídos de veículos do ciclo diesel. **Revista de Saúde Pública**, p. 8, 2005.
- ACHOUR, H.; CARTON, J. G.; OLABI, A. G. Estimating vehicle emissions from road transport, case study: Dublin City. **Applied Energy**, v. 88, n. 5, p. 1957–1964, 2011.
- AGÊNCIA REGULADORA DO ESTADO DO CEARÁ. Bases de dados de adensamento urbano. Fortaleza, CE, 2012.
- AKÇELIK, R.; SMIT, R.; BESLEY, M. Calibrating Fuel Consumption and Emission Models for Modern Vehicles. **IPENZ Transportation Group Conference**, 2012.
- ALVES, M. L.; BRANDAO, L. E. T. Automóvel Flex fuel: Quanto vale a opção de escolher? **XXXI Encontro da ANPAD**, 2007.
- ANDERSON, W. P.; KANAROGLOU, P. S.; MILLER, E. J.; BULIUNG, R. N. Simulating automobile emissions in an integrated urban model. **Transportation Research Record** 1520, 71–80, 1996.
- ARIOTTI, P. **Método para aprimorar a estimativa de emissões veiculares em áreas urbanas através de modelagem híbrida em redes**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2010.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **2 Milhões de Veículos Flex Fuel**. Disponível em <<http://www.anfavea.com.br/noticias/flexfuel.html>>. Acesso em: 16 mar. 2017.
- AYYILDIZ, K.; CAVALLARO, F.; NOCERA, S; WILLENBROCK, R. Reducing fuel consumption and carbon emissions through eco-drive training. **Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour**, v. 46, p. 96–110, 2017.
- BARLA, P.; MIRANDA-MORENO, L. F.; LEE-GOSSELIN, M. Urban travel CO2 emissions and land use: A case study for Quebec City. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 16, n. 6, p. 423–428, 2011.
- BILLIONNET, C.; SHERRILL, D.; ANNESI-MAESANO, I. Estimating the Health Effects of Exposure to Multi-Pollutant Mixture. **Annals of Epidemiology**, v. 22, n. 2, p. 126–141, 2012.
- BIODIESELBR. **PróAlcool - Programa Brasileiro de Alcool**, 2006. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/proalcool/pro-alcool/programa-etanol.htm>>. Acesso em 23 mar. 2017.
- BLONDEAU, P.; IORDACHE, V.; POUPARD, O.; GENIN, D.; ALLARD, F. Relationship between outdoor and indoor air quality in eight French schools. **Indoor Air**, v.15, n.1, p.2-12, 2005.
- BOSCH, R. **Manual de tecnologia automotiva**. 25 ed. São Paulo: Edgard Blücher. 1232p., 2005.

BRAND, C.; PRESTON, J. M. “60-20 emission”-The unequal distribution of greenhouse gas emissions from personal, non-business travel in the UK. **Transport Policy**, v. 17, n. 1, p. 9–19, 2010.

BRASIL. ANP: Resolução nº 30, de 29 de junho de 2015. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 30 jun. 2015.

BRASIL. Código de Trânsito Brasileiro (CTB). Lei Nº 9.503, de 23 de Setembro de 1997.

BRASIL. Decreto nº. 76.593, de 14 de Novembro de 1975.

CARSLAW, D. C.; RHYS-TYLER, G. New insights from comprehensive on-road measurements of NO_x, NO₂ and NH₃ from vehicle emission remote sensing in London, UK. **Atmospheric Environment**, v. 81, n. 2, p. 339–347, 2013.

CARVALHO JR., J. A.; LACAVA, P. T. Emissões em Processos de Combustão. Edição 1. São Paulo, UNESP, 2003.

CARVALHO, R. A Methodology to Estimate Fuel Consumption and Pollutant Emissions Based on Driving Profiles. p. 1–10, 2014.

CASSIANO, D. R. Avaliação das emissões poluentes de um veículo flex em percurso real urbano e rodoviário no Ceará. 2016. 143 f. Dissertação (Mestrado acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2016.

CAVALCANTE, R. M.; CAMPELO, C. S.; BARBOSA, M. J.; SILVEIRA, E. R.; CARVALHO, T. V.; NASCIMENTO, R. F. Determination of carbonyl compounds in air and cancer risk assessment in an academic institute in Fortaleza, Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 29, p. 5701–5711, 2006.

CAVALCANTE, R. M.; ROCHA, C. A.; DE SANTIAGO, I. S.; DA SILVA, T. F. A.; CATTONY, C. M.; SILVA, M. V. C.; SILVA, I. B.; THIERS, P. R. L. Influence of urbanization on air quality based on the occurrence of particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in a tropical semiarid area (Fortaleza-CE, Brazil). **Air Quality, Atmosphere and Health**, v. 10, n. 4, p. 437–445, 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 18/86, de 06 de maio de 1986**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 29 abr. 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 415/09, de 24 de setembro de 2009**. Disponível em: <<http://www.sema.df.gov.br>>. Acesso em: 02 dez. 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 382/06, de 26 de dezembro de 2006**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 27 maio 2017.

DAMM, C. J.; LUCAS, D. SAWYER, R.F.; KOSHLAND, C.P. Characterization of diesel particulate matter with excimer laser fragmentation fluorescence spectroscopy. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 29, n. 2, p. 2767–2774, 2002.

DARDIOTIS, C.; FONTARAS, G.; MAROTTA, A.; MARTINI, G.; MANFREDI, U. Emissions of modern light duty ethanol flex-fuel vehicles over different operating and environmental conditions. **Fuel**, v. 140, p. 531–540, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Frota de Veículos – 2016**. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/index.php/estatistica/261-frota-2016>>. Acesso em: 13 mar. 2017.

DRUMM, F. C.; GERHARDT, A. E.; FERNANDES, G. D.; CHAGAS, P.; SUCOLOTTI, M. S.; KEMERICH, P. D. da C. Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. **Reget**, v. 18, p. 66–78, 2014.

DUARTE, G. O.; GONÇALVES, G. A.; FARIAS, T. L. Analysis of fuel consumption and pollutant emissions of regulated and alternative driving cycles based on real-world measurements. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 44, p. 43–54, 2016.

E-cycle. **NOx: o que são e quais os impactos dos óxidos de nitrogênio**. Disponível em: <<http://www.ecycle.com.br/component/content/article/63/3052-nox-os-oxidos-de-nitrogenio-tipos-o-que-sao-onde-estao-causas-consequencias-aquecimento-global-efeito-estuda-nitrico-nitroso-dioxido-de-nitrogenio-fontes-emissoras-compostos-impactos-como-evitar-acoedicas.html>>. Acesso em: 07 abr. 2017.

ELFASAKHANY, A. Investigations on performance and pollutant emissions of spark-ignition engines fueled with n-butanol–, isobutanol–, ethanol–, methanol–, and acetone–gasoline blends: A comparative study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, n. May 2016, p. 404–413, 2016.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Permitting Under the Clean Air Act**. Disponível em <<https://www.epa.gov/caa-permitting>>. Acesso em: 01 jun. 2017.

ESTEVEES-BOOTH, A.; MUNEER, T.; KIRBY, H.; KUBIE, J.; HUNTER, J. The measurement of vehicular driving cycle within the city of Edinburgh. **Transportation Research Part D: Transport and Environment** 6, 209e220, 2001.

FAIZ, A.; WEAVER, C. S.; WALSH, M. P. Air Pollution from Motor Vehicles: Standards and Technologies for Controlling Emissions. Washington, D.C.: **World Bank Publications**, 1996. 243p.

FERGUSON, C.R.; KIRKPATRICK, A. T. Internal combustion engines: applied thermosciences. New York: Jonh Wiley & Sons, Inc., 2001. 369p.

FOLKSON, R. Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance. Number 57 ed. [s.l.] Woodhead Publishing Series in Energy, 2014.

FONTARAS, G.; ZACHAROF, N.-G.; CIUFFO, B. Fuel consumption and CO₂ emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 60, p. 97–131, 2017.

FORTALEZA. Lei nº 7.987 de 23 de dezembro de 1996. **Lei de Uso e Ocupação do Solo**. Atualização de agosto de 2010. Legislação Fortaleza, 2015. 250 p.

FRANCISCO, W. de C. e. **Proálcool**. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/brasil/proalcool.htm>>. Acesso em 22 mar. 2017.

FRANCO, V.; KOUSOULIDOU, M. MUNTEAN, M. NTZIACHRISTOS, L; HAUSBERGER, S. DILARA, P. Road vehicle emission factors development: A review. **Atmospheric Environment**, v. 70, p. 84–97, 2013.

FRANCO, V.; SÁNCHEZ, F. P.; GERMAN, J.; MOCK, P. Real-World Exhaust Emissions from Modern Diesel Cars: A Meta-Analysis of PEMS Emissions Data from EU (EURO 6) and US (TIER 2 BIN 5/ULEV II) Diesel Passenger Cars. Outubro, 2014.

FRANK, L. D.; STONE, B.; BACHMAN, W. Linking land use with household vehicle emissions in the central puget sound: Methodological framework and findings. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 5, n. 3, p. 173–196, 2000.

FREITAS, A. M.; SOLCI, M. C. Caracterização do MP10 e MP2,5 e distribuição por tamanho de cloreto, nitrato e sulfato em atmosfera urbana e rural de Londrina. **Química Nova**, v.32, n.7, p.1750-1754, 2009.

FREY, H. C.; UNAL, A.; ROUPHAIL, N. M.; COLYAR, J. D. Emissions Reduction Through Better Traffic Management: An Empirical Evaluation Based Upon On-Road Measurements. **Prepared by NC State University for NC Department of Transportation, Raleigh**, v. NC: 28, 2001.

FREY, H. C.; UNAL, A.; ROUPHAIL, N. M.; COLYAR, J. D. On-road measurement of vehicle tailpipe emissions using a portable instrument. **Journal of the Air & Waste Management Association (1995)**, v. 53, n. 8, p. 992–1002, 2003.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER. **Qualidade Ambiental**. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/poluentes.asp>>. Acesso em 23 maio 2017.

GAO, O.H. Day of week effects on diurnal ozone/NOx cycles and transportation emissions in Southern California. **Transportation Research Part D: Transport and Environment** 12, 292–305. 2007.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4 ed. São Paulo: **Atlas S.A.** 2002.

GRIESHOP, A. P.; BOLAND, D.; REYNOLDS, C. C. O.; GOUGE, B.; APTE, J. S.; ROGAK, S. N.; KANDLIKAR, M. Modeling air pollutant emissions from Indian auto-rickshaws: Model development and implications for fleet emission rate estimates. **Atmospheric Environment**, v. 50, p. 148–156, 2012.

HATZOPOULOU, M.; MILLER, E. J. Linking an activity-based travel demand model with traffic emission and dispersion models: Transport's contribution to air pollution in Toronto.

Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 15, n. 6, p. 315–325, 2010.

HIGA, H. Y. **Estudo e proposição para redução de consumo do motor flex-fuel estudo e proposição para redução de consumo do motor flex-fuel**. [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

HONG, J.; GOODCHILD, A. Land use policies and transport emissions: Modeling the impact of trip speed, vehicle characteristics and residential location. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 26, p. 47–51, 2014.

HONG, J.; SHEN, Q. Residential density and transportation emissions: Examining the connection by addressing spatial autocorrelation and self-selection. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 22, p. 75–79, 2013.

INT PANIS, L.; BECKX, C.; BROEKX, S.; DE VLIETGER, I.; SCHROOTEN, L.; DEGRAEUWE, B. PM, NO_x and CO₂ emission reductions from speed management policies in Europe. **Transport Policy**, v. 18, n. 1, p. 32–37, 2011.

INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM. Reducing Transport Greenhouse Gas Emissions. On: **Transport and Innovation: Unleashing the Potential**. Alemanha. 2010.

JIMÉNEZ-PALACIOS, J. L. **Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing**. [s.l.] Massachusetts Institute of Technology, 1999.

KAHN, M. E. A household level environmental Kuznets curve. **Economics Letters**, v. 59, n. 2, p. 269–273, 1998.

KAMPA, M.; CASTANAS, E. Human health effects of air pollution. **Environmental Pollution**, v. 151, n. 2, p. 362–367, 2008.

KO, J.; PARK, D.; LIM, H.; HWANG, I. C. Who produces the most CO₂ emissions for trips in the Seoul metropolis area? **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 16, n. 5, p. 358–364, 2011.

KOUSOULIDOU, M.; FONTARAS, G.; NTZIACHRISTOS, L.; BONNEL, P. SAMARAS, Z.; DILARA, P. Use of portable emissions measurement system (PEMS) for the development and validation of passenger car emission factors. **Atmospheric Environment**, v. 64, n. x, p. 329–338, 2013.

KUKLINSKA, K.; WOLSKA, L.; NAMIESNIK, J. Air quality policy in the U.S. and the EU – a review. **Atmospheric Pollution Research**, v. 6, n. 1, p. 129–137, 2015.

LI, T.; CHEN, X.; YAN, Z. Comparison of fine particles emissions of light-duty gasoline vehicles from chassis dynamometer tests and on-road measurements. **Atmospheric Environment**, v. 68, p. 82–91, 2013.

LINDHJEM, C. E.; POLLACK, A. K.; DENBLEYKER, A.; SHAW, S. L. Effects of improved spatial and temporal modeling of on-road vehicle emissions. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 62, n. 4, p. 471–484, 2012.

LOUREIRO, L. N. Panorâmica Sobre Emissões Atmosféricas Estudo De Caso: Avaliação Do Inventário Emissões Atmosféricas Da Região Metropolitana Do Rio De Janeiro Para Fontes Móveis. p. 153, 2005.

MARCO, G.; BO, X. Air Quality Legislation and Standards in the European Union: Background, Status and Public Participation. *Advances in Climate Change Research*, v. 4, n. 1, p. 50–59, 2013.

MARTIN, A. N; BOULTER, P. G.; RODDIS, D.; MCDONOUGH, L.; PATTERSON, M.; RODRIGUEZ DEL BARCO, M.; MATTES, A.; KNIBBS, L. D. In-vehicle nitrogen dioxide concentrations in road tunnels. *Atmospheric Environment*, v. 144, n. 2, p. 234–248, 2016.

MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. Porto: Publindústria. 437p, 2005.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Poluentes Atmosféricos**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosf%C3%A9ricos>>. Acesso em 04 jun. 2017.

MOTTA, R. S. da; FERREIRA, L. da R. The Brazilian National Alcohol Programme. *Energy Economics*, p. 229-234, 1988.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. **Climate breaks multiple records in 2016, with global impacts**. Disponível em: <<https://public.wmo.int/en/media/press-release/climate-breaks-multiple-records-2016-global-impacts>>. Acesso em 23 maio 2017.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. Selected non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons, environmental health criteria, 202, United Nations Environment Programme, International Labour Organisation, World Health Organization, Geneva, 1998.

PANG, Y.; FUENTES, M.; RIEGER, P. Trends in the emissions of Volatile Organic Compounds (VOCs) from light-duty gasoline vehicles tested on chassis dynamometers in Southern California. *Atmospheric Environment*, v. 83, p. 127–135, 2014.

INSTITUTO DE PLANEJAMENTO DE FORTALEZA. **Plano de Mobilidade de Fortaleza, PlanMob**. (2015).

PROGRAMA DE CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR POR VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Manual PROCONVE/PROMOT**. Coleção Meio Ambiente. Série Diretrizes-Gestão n.3, IBAMA. 3. ed. Brasília, 2011.

QUEIROZ, P. G. M.; JACOMINO, V. M. F.; MENEZES, M. A. B. C. Composição elementar do material particulado presente no aerossol atmosférico do município de sete lagoas. *Química Nova*, v.30, n.5, p.1233-1239, 2007.

ROCHA, C. A. SOUSA, F. W.; ZANELLA, M. E.; OLIVEIRA, A. G.; NASCIMENTO, R. F.; SOUZA, O. V.; CAJAZEIRAS, I. M. P.; LIMA, J. L. R.; CAVALCANTE, R. M.

Environmental Quality Assessment in Areas Used for Physical Activity and Recreation in a City Affected by Intense Urban Expansion (Fortaleza-CE, Brazil): Implications for Public Health Policy. **Exposure and Health**, p. 1–14, 2016.

RODRÍGUEZ, R. A.; VIRGUEZ, E. A.; RODRÍGUEZ, P. A.; BEHRENTZ, E. Influence of driving patterns on vehicle emissions: A case study for Latin American cities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 43, p. 192–206, 2016.

SAMUEL, S.; AUSTIN, L.; MORREY, D. Automotive test drive cycles for emission measurement and real-world emission levels – a review. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, 216:555–64, 2002.

SECRETARIA DE FINANÇAS DE FORTALEZA. Bases de dados de padrão de uso do solo. Fortaleza, CE, 2015.

SIDER, T.; ALAM, A.; ZUKARI, M.; DUGUM, H.; GOLDSTEIN, N.; ELURU, N.; HATZOPOULOU, M. Land-use and socio-economics as determinants of traffic emissions and individual exposure to air pollution. **Journal of Transport Geography**, v. 33, p. 230–239, 2013.

SOUSA, F. W.; CAVALCANTE, R. M.; ROCHA, C. A.; NASCIMENTO, R. F.; FERREIRA, A. G. Carbonyl compounds from urban activities and their associated cancer risks: The influence of seasonality on air quality (Fortaleza-Ce, Brazil). **Urban Climate**, v. 13, p. 110–121, 2015.

SUAREZ-BERTOIA, R.; ZARDINI, A. A.; KEUKEN, H.; ASTORGA, C. Impact of ethanol containing gasoline blends on emissions from a flex-fuel vehicle tested over the Worldwide Harmonized Light duty Test Cycle (WLTC). **Fuel**, v. 143, p. 173–182, 2015.

THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION. **A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards**. Disponível em <http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Euro6-VI_briefing_jun2016.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2017.

TIETGE, U.; MOCK, P.; FRANCO, V.; ZACHAROF, N. From laboratory to road: Modeling the divergence between official and real-world fuel consumption and CO₂ emission values in the German passenger car market for the years 2001-2014. **Energy Policy**, v. 103, n. May 2016, p. 212–222, 2017.

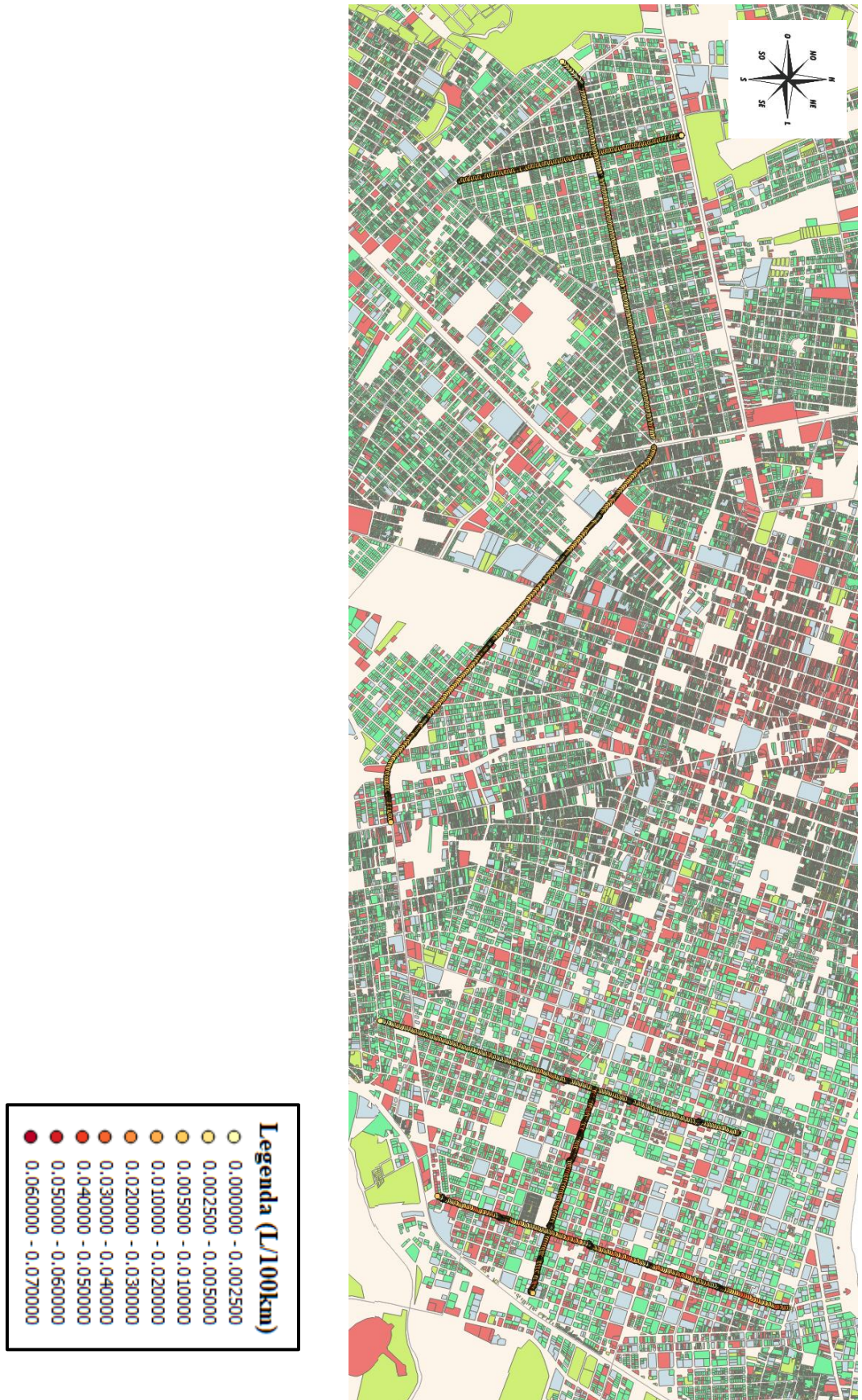
TOMTOM TRAFFIC INDEX. **Full ranking**. Disponível em <http://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex/list?citySize=LARGE&continent=ALL&country=ALL>. Acesso em: 28 mar. 2017.

TZIRAKIS, E.; PITSAS, K.; ZANNIKOS, F.; STOURNAS, S. Vehicle Emissions and Driving Cycles: Comparison of the Athens Driving Cycle (Adc) With Ece-15 and European Driving Cycle (Edc). **Global NEST Journal**, v. 8, n. 3, p. 282–290, 2006.

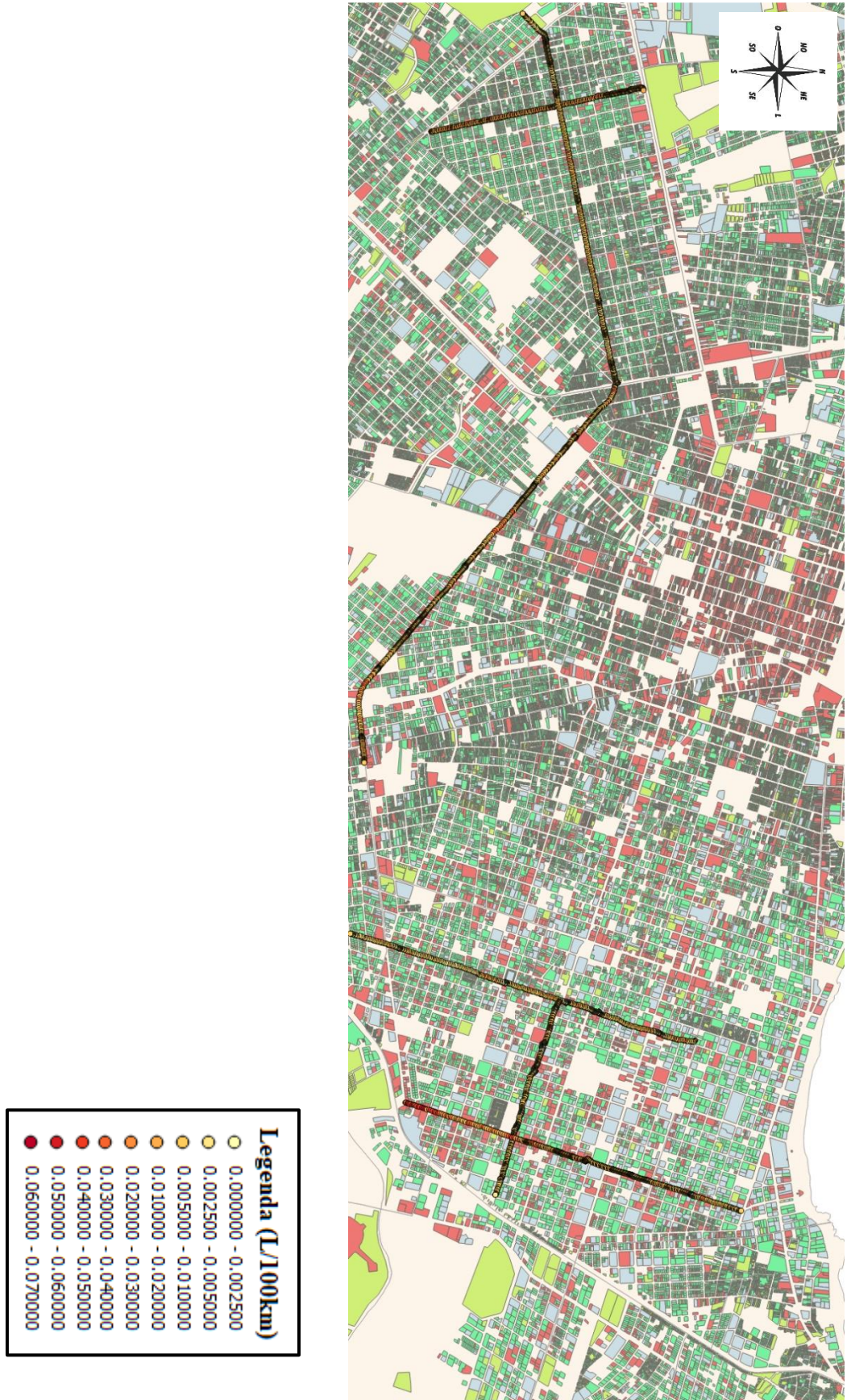
UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Indústria brasileira de cana-de-açúcar: Uma trajetória de evolução**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/linhadotempo/index.html>>. Acesso em: 28 ago. 2017.

- UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Ciclo de Otto**. [2009?]. Disponível em <https://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/ciclo_otto.htm>. Acesso em: 10 ago. 2017.
- VALLERO, D. A. **Fundamentals of Air Pollution**. 4. Ed. San Diego: Elsevier Inc., 2008.
- VALLERO, D. A. **Fundamentals of Air Pollution**. 5. Ed. California: Elsevier Inc., 2014.
- VASCONCELLOS, E. A. de. **Políticas de Transporte no Brasil: a construção da mobilidade excludente**. Barueri, SP: Manole, 2013.
- VIEIRA, B. M. P.; BERTONCINI, B. V.; SOUSA, F. F. L. M.; AZEVEDO FILHO, M. A. N. Caracterização das Viagens do Transporte Público com Dados do SBE e Uso do Solo. **ANTP**. 2017.
- WANG, C.; XU, H.; HERREROS, J. M.; WANG, J.; CRACKNELL, R. Impact of fuel and injection system on particle emissions from a GDI engine. **Applied Energy**, v. 132, p. 178–191, 2014.
- WANG, Y.; XING, Z.; XU, H.; DU, K. Emission factors of air pollutants from CNG-gasoline bi-fuel vehicles: Part I. Black carbon. **Science of the Total Environment**, v. 572, p. 1161–1165, 2016.
- WEISS, M.; BONNEL, P.; HUMMEL, R.; MANFREDI, U.; COLOMBO, R.; LANAPPE, G.; LIJOUR, P. L.; SCULATI, M. Analyzing on-road emissions of light-duty vehicles with Portable Emission Measurement Systems (PEMS). 2011.
- WRIGHT, T.; HU, S. P.; YOUNG, J.; LU, A. Variability in traffic monitoring data. Oak Ridge National Laboratory. p. 94, 1997.
- XIAO, Z.; DUI-JIA, Z.; JUN-MIN, S. *A Synthesis of Methodologies and Practices for Developing Driving Cycles*. Energy Procedia. In 2012 **International Conference on Future Energy, Environment, and Materials Part C**, v. 16, p. 1868-1873. 2012.
- YANG, W.; OMAYE, S. T. Air pollutants, oxidative stress and human health. **Mutation research**, v. 674, n. 1-2, p. 45–54, 2009.
- ZHANG, Q.; SUN, G.; FANG, S.; TIAN, W.; LI, X.; WANG, H. Air pollutant emissions from vehicles in China under various energy scenarios. **Science of the Total Environment**, v. 450-451, p. 250–258, 2013.
- ZHANG, R.; MATSUSHIMA, K.; KOBAYASHI, K. Can land use planning help mitigate transport-related carbon emissions? A case of Changzhou. **Land Use Policy**, n. December 2016, p. 0–1, 2017.
- ZHOU, Y.; WU, Y.; ZHANG, S.; FU, L.; HAO, J. Evaluating the emission status of light-duty gasoline vehicles and motorcycles in Macao with real-world remote sensing measurement. **Journal of Environmental Sciences-China**, v. 26, n. 11, p. 2240–2248, 2014.

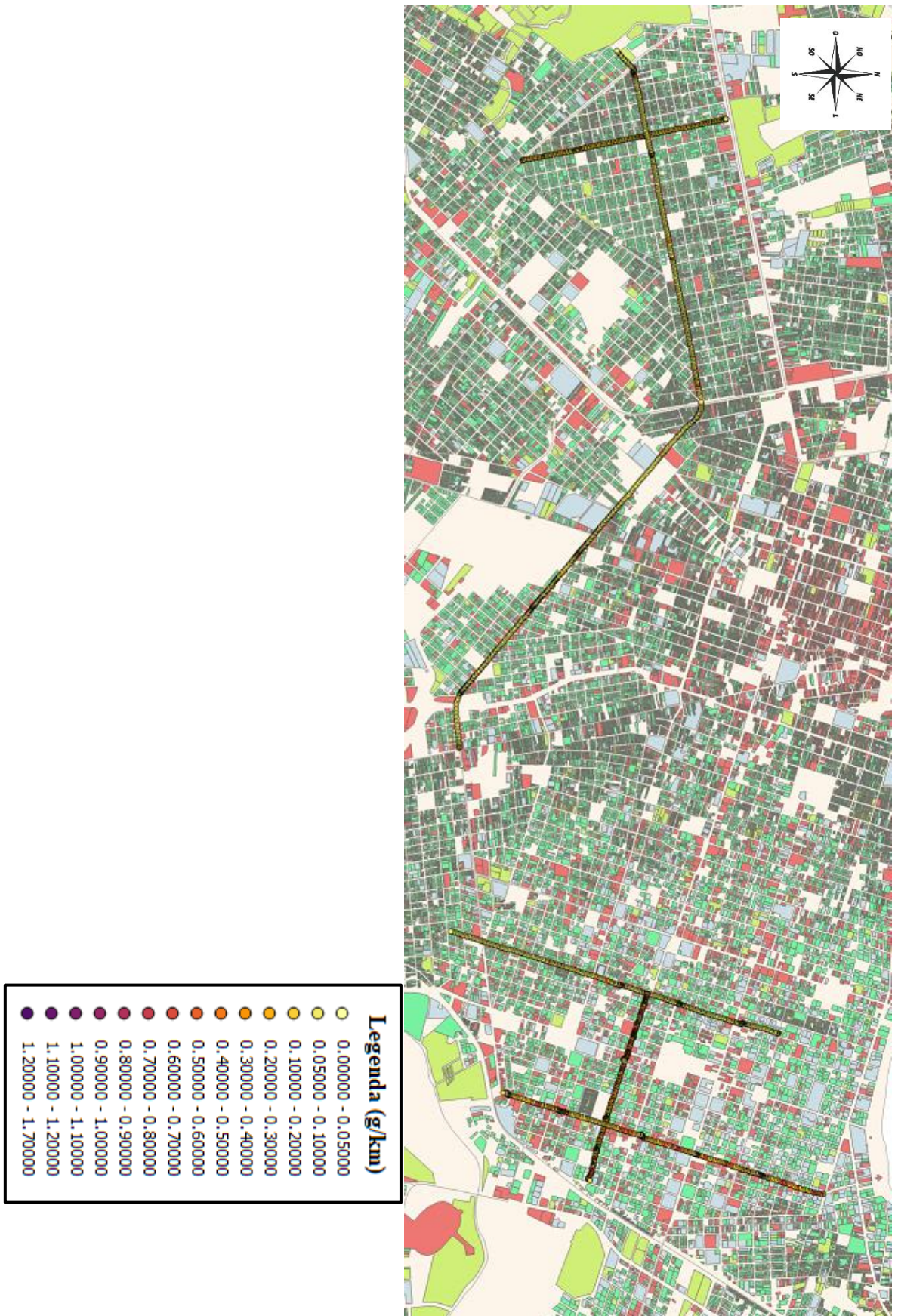
APÊNDICE A – CONSUMO DE COMBUSTÍVEL (FORA PICO)



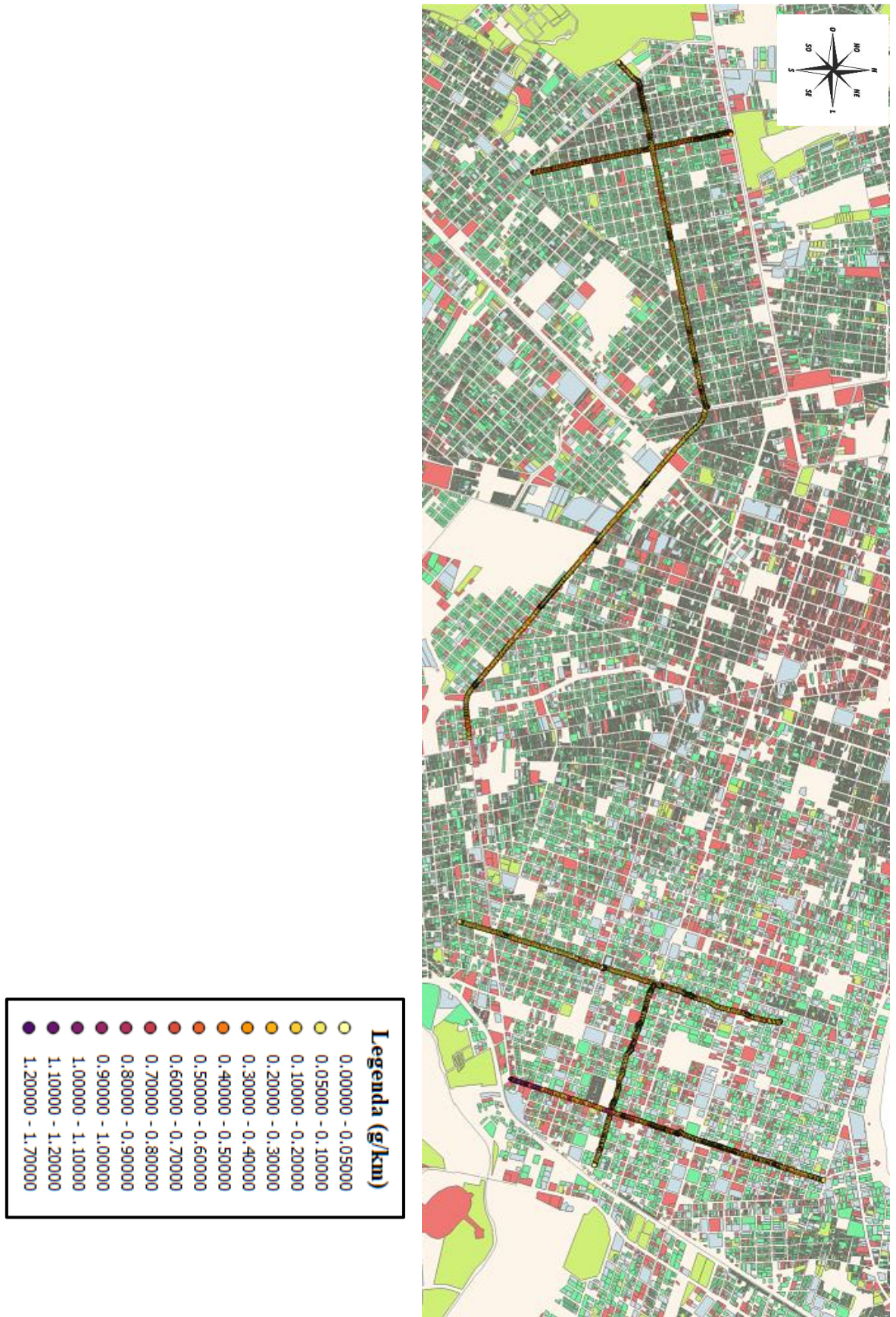
APÊNDICE B – CONSUMO DE COMBUSTÍVEL (PICO)



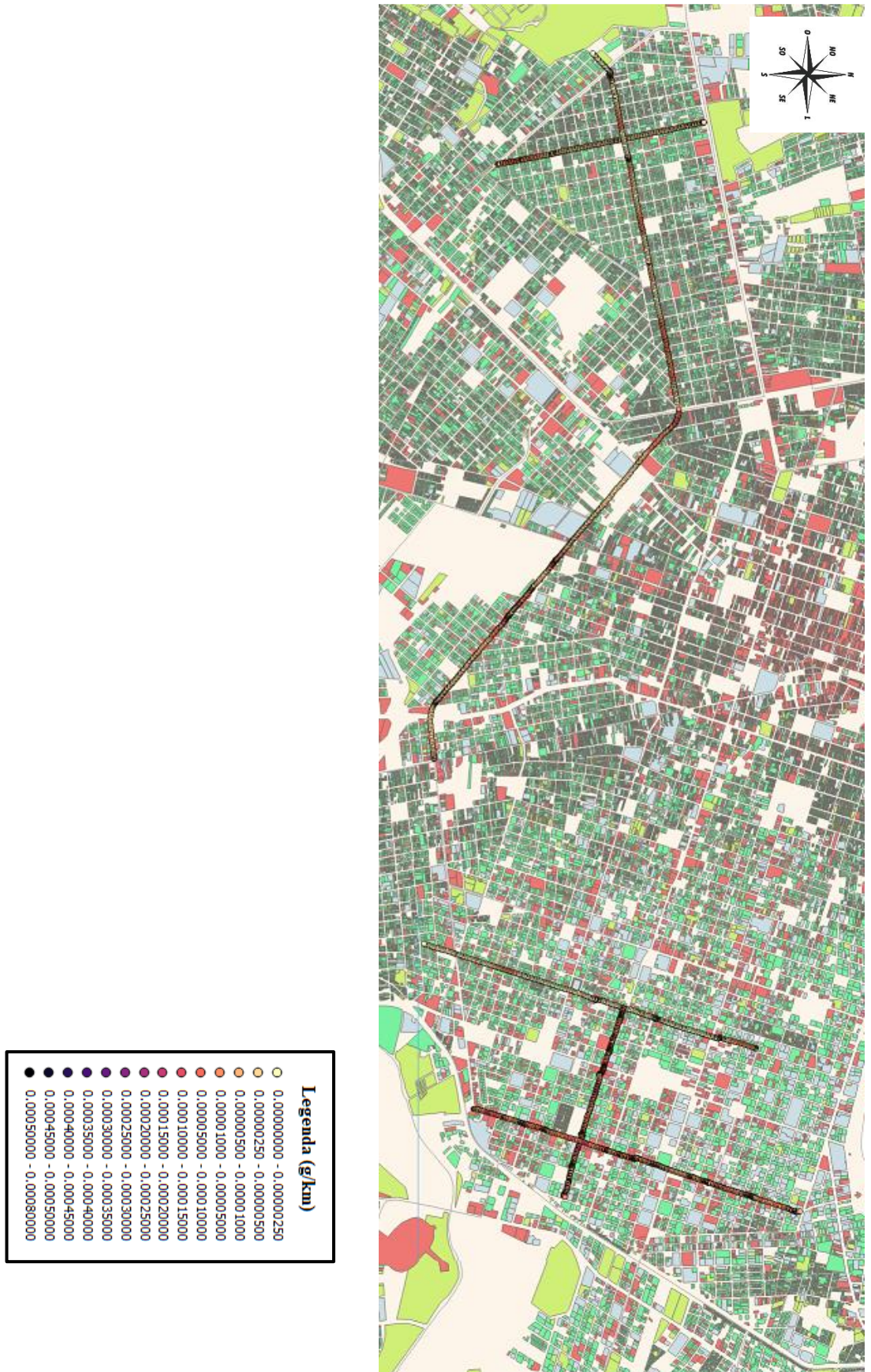
APÊNDICE C – EMISSÃO DE CO₂ (FORA PICO)



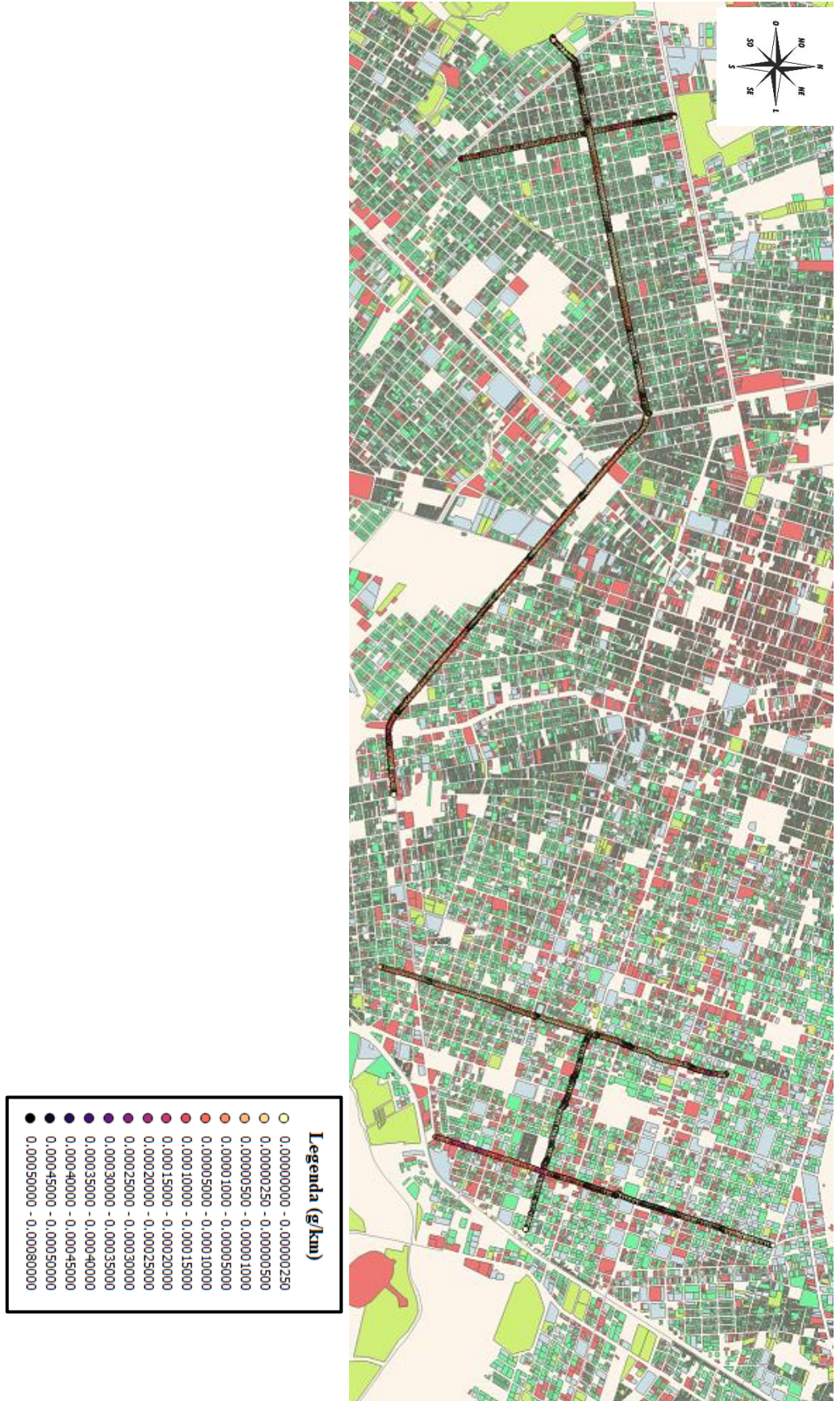
APÊNDICE D – EMISSÃO DE CO₂ (PICO)



APÊNDICE E – EMISSÃO DE NO_x (FORA PICO)



APÊNDICE F – EMISSÃO DE NO_x (PICO)



ANEXO A – RESULTADO DA ANÁLISE DE COMBUSTÍVEL

Fonte: (Grupo de Pesquisa em Separações por Adsorção - GPSA, 2017).

Resultado análise de gasolina tipo C aditivada

Aspecto	Límpido com impurezas
Cor	verde
Massa específica a 20 °C	753,8 kg/m ³
Teor de AEAC	27%
Destilação PIE	40,3 ° C
Destilação 10%	55,4 ° C
Destilação 20%	61,3 ° C
Destilação 30%	65,8 ° C
Destilação 40%	69,3 ° C
Destilação 50%	72,1 ° C
Destilação 60%	74,1 ° C
Destilação 70%	75,7 ° C
Destilação 80%	134,1 ° C
Destilação 90%	162,0 ° C
Destilação 95%	178,3 ° C
Destilação PFE	201,4 ° C
Resíduo	1.10%
Perda	1.70%
Octanagem MON	96.8
Octanagem RON	83.2
Octanagem IAD	90.0