

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Magdala Satt Arioli

**SISTEMATIZAÇÃO DE UM INVENTÁRIO DE
EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA
PARA MOBILIDADE URBANA**

Porto Alegre

2020

Magdala Satt Arioli

**SISTEMATIZAÇÃO DE UM INVENTÁRIO DE EMISSÕES DE GASES DE
EFEITO ESTUFA PARA MOBILIDADE URBANA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, na área de concentração em Sistemas de Transportes

Orientadora: Prof. Helena Beatriz Bettella Cybis, *Ph.D.*

Co-orientador: Prof. Márcio de Almeida D'Agosto, D.Sc

Porto Alegre

2020

Magdala Satt Arioli

**SISTEMATIZAÇÃO DE UM INVENTÁRIO DE EMISSÕES DE GASES DE
EFEITO ESTUFA PARA MOBILIDADE URBANA**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador, Co-orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Helena Beatriz Bettella Cybis, *Ph.D.*
Orientadora PPGEP/UFRGS

Prof. Márcio de Almeida D'Agosto, *D.Sc.*
Co-orientador PPGEP/UFRGS

Prof. Alejandro Germán Frank, *Dr.*
Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professora Andrea Souza Santos, *D.Sc.* (UFRJ/COPPE)

Professora Leticia Dexheimer, *Dra.* (UFPeI/CIM)

Professor Luis Antonio Lindau, *Ph.D.* (WRI Brasil)

Dedicatória

Para todos que acreditam na urgência de combater às mudanças climáticas e que contribuem, através de pequenas atitudes e mudanças de hábitos, para a preservação do planeta Terra.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Dante e Magda, pelo amor, incentivo, dedicação e apoio incondicional durante todo o período do doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de doutorado por um determinado período.

À Profa. Helena Bettella Cybis, minha orientadora, pelos valiosos conselhos, orientação e auxílio constante.

Ao Prof. Márcio Almeida da D'Agosto, meu co-orientador, pela ajuda, incentivo e conhecimentos transmitidos.

Ao Prof. Luis Antonio Lindau, por todos os ensinamentos repassados desde início da minha jornada acadêmica.

Ao Prof. Lewis Fulton, que me recebeu no Institute of Transportation Studies da UC Davis por um período de muito conhecimento e aprendizado.

Às Professoras Andrea Souza e Letícia Dexheimer, integrantes da banca, pelas contribuições para o aperfeiçoamento da minha tese.

Ao Programa de Pós Graduação da Engenharia de Produção e seu corpo docente por ter oferecido todo o apoio necessário para a realização deste trabalho.

Aos colegas do LASTRAN, em especial Verônica, Shanna e Rodrigo, pela convivência, trocas de experiências, incentivo e constante apoio.

Ao Daniel Neves Schmitz Gonçalves, doutorando do Programa de Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ, pelo constante auxílio e ajuda.

A todos amigos e amigas, principalmente Joana, Rita e Viviane pela amizade, incentivo e companheirismo durante toda essa jornada.

RESUMO

Esta tese aborda o processo de elaboração de inventários de emissões de gases de efeito estufa (GEE) para mobilidade urbana. Diante da contribuição das emissões de transportes nas cidades brasileiras e a da importância da realização de um inventário como ferramenta para elaboração de políticas climáticas, esta tese propõe uma sistematização de um inventário *bottom-up* de emissões de GEE para mobilidade urbana nas cidades brasileiras, tendo como estudo de caso Belo Horizonte. O processo de construção da sistematização é realizado através de três artigos. No primeiro artigo, por meio de uma revisão sistemática, avalia-se a evolução das metodologias de inventários de GEE a nível local, e identifica como as cidades têm estimado as emissões de transportes – abordagem *top down* ou *bottom-up*. No segundo artigo, o processo de elaboração de inventário de emissões de GEE em Belo Horizonte é analisado, assim como o impacto dessa prática no desenvolvimento de políticas climáticas. A sistematização de um inventário *bottom-up* é apresentada no terceiro artigo. O processo da sistematização identifica pontos críticos que comprometem a qualidade do inventário: abrangência das emissões no limite da cidade, déficit de dados para o modo de transporte motorizado individual e determinação do *market share* do consumo de etanol. O trabalho conclui que ações de melhorias para coleta de dados como inspeção veicular associada ao uso de novas tecnologias como Big Data apresentam potencial para auxiliar na qualidade do inventário. Por fim, a sistematização proposta nesta tese, além de caracterizar o perfil das emissões de GEE da mobilidade urbana, fornece uma base de dados com nível de detalhamento que pode auxiliar as cidades na tomada de decisão e direcionar apropriadamente medidas mitigatórias de GEE.

Palavras-chave: mudanças climáticas; transporte rodoviário urbano; inventário de emissões GEE; quantificação emissões GEE transportes.

ABSTRACT

This thesis addresses the elaboration process of greenhouse gas (GHG) emissions inventory for urban mobility. In light of the contribution of transport emissions in Brazilian cities and the importance of compiling GHG inventory as a tool to guide climate policies, this study proposes a systematization of a bottom-up GHG inventory for urban mobility, using Belo Horizonte, Brazil, as a case study. The construction of the systematization is conducted in three articles. In the first article, through a systematic review, the evolution of city-scale GHG inventory methodologies is assessed, and it identifies how cities are estimating transport emissions - top down or bottom-up approach. In the second article, the elaboration process of a GHG inventory in Belo Horizonte is analyzed, as well as the impact of this practice on the development of climate policies. The systematization of a bottom-up inventory is presented in the third article. The systematization process identifies critical points that compromise the quality of the inventory: the allocation of emission according to the system boundary, deficit of data for the private motorized modes and determination of the market share of ethanol consumption. The thesis concludes that measures to improve data collection such as vehicular inspection associated with the use of new technologies such as Big Data have the potential to assist in the quality of the inventory. Finally, the systematization proposed in this thesis provides the profile of GHG emissions from urban mobility and in addition offers a database with detail level that can assist cities authorities to guide appropriately GHG mitigation measures.

Keywords: climate change; urban road transport; GHG inventory; GHG inventory methods; transport GHG accounting.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABLA - Associação Brasileira das Locadoras de Automóveis
ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BEI - Baseline Emissions Inventory
BH - Belo Horizonte
BHTRANS - Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte
CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH₄ - Metano
CMMCE - Comitê Municipal sobre Mudanças Climáticas e Ecoeficiência
CNG - Compressed Natural Gas
CO - Monóxido de Carbono
CO₂ - Dióxido de carbono
CO₂e - Dióxido de carbono equivalente
COP - Conferência das Partes
GHG - Greenhouse Gas
COPASA - Companhia de Saneamento de Minas Gerais
GASMIG - Companhia de Gás de Minas Gerais
GEE - Gases de Efeito Estufa
GHG Protocol - Programa do Greenhouse Gas Protocol
GT - Grupo de Trabalho
ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade
Google EIE - Google Environmental Insight Explorer
GPC - Global Protocol for Community-Scale GHG Emissions (Protocolo Global para Emissões de GEE de Comunidades)
GWP - Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global)
HC - Hidrocarbonetos
IBTS - Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável
IOA - Input–Output Analysis
IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change
ISC - International Standard for Greenhouse Gas for Cities
LCA - Lifecycle Assessment
ISO - International Organization for Standardization

MCT - Ministério de Ciência, Tecnologia e Informação

MMA - Ministério do Meio Ambiente

Mt - Million tonne

MRV - Measurement, Reporting and Verification

N₂O - Óxido Nitroso

NDC - Nationally Determined Contribution (Contribuição Nacionalmente Determinadas)

NO_x - Óxidos De Nitrogênio

PBEV - Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular

PLDV - Passenger Light Duty-Vehicle

PREGEE - Plano de Redução das Emissões de Gases de Efeito Estufa de Belo Horizonte

RMBH - Região Metropolitana de Belo Horizonte

SMMA - Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Belo Horizonte

TNC - Transportation Network Companies

UCF - Urban Carbon Footprint

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change

VKT - Vehicle Kilometers Traveled

VP - Vehicle Population

SUMÁRIO

1. Introdução	11
1.1. Considerações iniciais	11
1.2. Tema e objetivo da tese	13
1.3. Justificativa.....	14
1.4. Procedimentos Metodológicos	15
1.5. Delimitações do Trabalho.....	18
1.6. Estrutura do Trabalho	18
1.7. Referências	18
5. Considerações Finais	21

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

No Acordo de Paris, assinado em 2015, 195 países concordaram com a meta de limitar o aquecimento global abaixo da temperatura de 2°C acima dos níveis pré-industriais e buscar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C (UNFCCC, 2015). O Acordo de Paris é o primeiro acordo climático internacional que se refere à necessidade de emissões líquidas-zero, ou seja, atingir um equilíbrio entre as emissões de gases de efeito estufa (GEE) por fontes emissoras e remoções por sumidouros (DAY et al. 2015), e essa meta idealmente deve ser alcançada até segunda metade deste século (FIGUERES; RIVETT-CARNAC, 2020; ROGELJ et al., 2015, 2016).

Projeções globais revelam que um cenário alinhado com as metas do Acordo de Paris exigiria uma descarbonização quase total da economia até 2060 ou antes (LUDERER et al., 2013; ROCKSTRÖM et al., 2017; ROGELJ et al., 2013). Para alcançar esse cenário, será preciso avanços tecnológicos transformadores e a implementação de uma série de estratégias de descarbonização (WALSH et al., 2017). No entanto, a maioria das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) propostas pelos países signatários estão longe de contribuir para o ambicioso cenário de descarbonização a longo prazo (ROGELJ et al., 2016; SCHLEUSSNER et al., 2016). A maioria dos países precisará fortalecer seus esforços de mitigação antes de 2030 a fim de manter-se alinhados às metas do Acordo de Paris (WAISMAN et al., 2019; XUNZHANG et al., 2017). Para Figueres e Rivett-Carnac (2020), estamos na década crítica, ou seja, o objetivo de reduzir pela metade as emissões globais até 2030 representa o mínimo absoluto que deve-se alcançar para se ter pelo menos 50% de chance de proteger a humanidade dos piores impactos.

Diante desse cenário, o setor de transportes tem um papel importante a desempenhar. Em 2017, o setor de transportes emitiu aproximadamente oito gigatoneladas de emissões de dióxido de carbono (CO₂), esse valor representa cerca de 25% da demanda global de energia e 14% das emissões antrópicas globais de GEE (IEA, 2019). As emissões deste setor, principalmente em áreas urbanas, estão crescendo mais rapidamente do que de outros setores devido às transformações demográficas e comportamentais, além do impulso proporcionado pela economia, especialmente nos países em desenvolvimento. Se as tendências atuais

persistirem, o setor de transportes tem potencial de se tornar um grande obstáculo para evitar as mudanças climáticas (CREUTZIG et al., 2015).

No contexto urbano, o primeiro passo para desenvolver políticas de mitigação para o setor de transportes é através da contabilização das suas emissões para, então, elaborar um plano de ação. A contabilidade de emissões de GEE a nível da cidade é necessária para que as autoridades locais compreendam a origem dessas emissões e adotem ações eficazes de mitigação. A elaboração de um inventário, no entanto, apresenta alguns desafios, como: escolha do método para contabilizar as emissões; definição da área da abrangência das emissões a serem contabilizadas; e, principalmente, falta de disponibilidade e qualidade dos dados (CREUTZIG et al., 2019; KENNEDY et al., 2010; LOMBARDI et al., 2017; MARTIRE; MIRABELLA; SALA, 2018; MI et al., 2019).

Desde 2010, diretrizes para elaboração de inventário de emissões de GEE a nível local vêm sendo propostas e aprimoradas (CONVENANT OF MAYORS, 2010; GPC, 2014; WORLD BANK; UN-HABITAT; UNEP, 2010). Independente da diretriz adotada pela cidade, em geral o cálculo para as emissões de GEE de transportes seguem as diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC). Segundo o IPCC, as emissões de GEE para transporte rodoviário podem ser calculadas pelo consumo - quantidade de combustível consumido por um veículo - multiplicada pelos fatores de emissão correspondentes de CO₂ (abordagem de cima para baixo, amplamente conhecida pelo termo em inglês, *top down*) ou cálculos a partir da quilometragem média percorrida e do fatores de emissão (abordagem de baixo para cima, do inglês *bottom-up*) (IPCC, 2006; WALDRON et al., 2006).

A abordagem *bottom-up* é interpretada de maneira geral pelo modelo ASIF requer uma quantidade de dados superior ao requerido pela abordagem *top down*. O modelo ASIF parte do princípio que as emissões do transporte rodoviário são resultado de quatro efeitos: Atividades (*Activity*), distância percorrida e o número de viagens; Escolha Modal (*Structure*) descreve os diferentes modos de transporte e tipo do veículo; Intensidade energética (*Intensity*) é a energia consumida por cada modo, influenciada pelas características do veículo e condições de condução; e Combustível (*Fuel*) baseado na composição do combustível (SCHIPPER; MARIE-LILLIU; GORHAM, 2000).

As cidades, geralmente, iniciam a contabilização das emissões de GEE a partir da abordagem *top-down* e evoluem para *bottom-up* conforme a disponibilidade dos dados (GPC,

2014). Os dados requeridos para quantificação pela abordagem *top down*, volume de vendas combustível e fator de emissão do combustível, são, na maioria das vezes, de fácil acesso e apresentam boa acurácia. Assim, os inventários *top down* são amplamente adotados. Entretanto, os resultados provenientes desta abordagem fornecem emissões por combustível, não permitindo estabelecer perfil das emissões de GEE categorizado por modos de transporte. Desta forma, limita o desenvolvimento de estratégias direcionadas de mitigação de GEE no setor de transportes.

A quantificação das emissões de GEE do setor de transporte rodoviário a partir da abordagem *bottom-up* possibilita identificar causas individuais; porém, requer uma quantidade considerável de dados, estes que em sua maioria são indisponíveis. Perante a indisponibilidade desses dados, muitos pressupostos precisam ser feitos, o que resulta em incertezas no resultado final, principalmente nos países em desenvolvimento, onde há frequentemente falta de dados e recursos limitados para elaboração de inventário de emissões de GEE (HUIZENGA; BAKKER, 2010; NAGENDRA et al., 2018; VIEWEG, 2017).

1.2. Tema e objetivo da tese

O tema principal desta tese é a quantificação das externalidades que contribuem para mudanças climáticas resultantes das atividades do setor de transporte rodoviário de passageiros nas áreas urbanas.

O objetivo geral desta tese é propor uma sistematização de um inventário *bottom-up* das emissões de GEE para mobilidade urbana nas cidades brasileiras. A sistematização do inventário tem como estudo de caso a cidade Belo Horizonte por ser uma cidade com histórico de engajamento na temática das mudanças climáticas. Para que seja possível atingir o objetivo geral, é necessário atingir-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar como as emissões de transportes, no contexto de um inventário geral para cidades, são estimadas conforme as abordagens do IPCC (*top down* e *bottom-up*);
- b) Identificar quais são as fontes de dados para o cálculo das emissões de transportes de acordo com as variáveis do modelo ASIF;
- c) Analisar o processo de realização de inventário de emissões de GEE em Belo Horizonte;
- d) Identificar quais são os dados disponíveis da mobilidade urbana em Belo Horizonte;

- e) Propor uma avaliação qualitativa para os dados da mobilidade urbana;
- f) Propor uma sistematização de um inventário *bottom-up* para mobilidade urbana;
- g) Recomendar melhorias na coleta dos dados da mobilidade urbana.

1.3. Justificativa

O setor de transportes no Brasil é responsável pela maior parte das emissões de GEE do setor de energia brasileiro, contribui com 45% das emissões associadas ao uso de energia (SEEG, 2019). No contexto urbano, as externalidades de transportes representam em média 60% do total das emissões de GEE (BALTAR DE SOUZA LEÃO et al., 2020). Logo, a quantificação dos principais poluentes gerados pelo setor de transportes é fundamental para a formulação de políticas públicas ambientais e de gestão de transporte e trânsito, visto que o consumo de energia no transporte urbano deverá duplicar até 2050 (IEA, 2013).

Atualmente, as principais cidades brasileiras realizam inventários de GEE, no entanto as emissões do setor de transportes são estimadas através da abordagem *top down*. Essa abordagem agregada de estimativa das emissões não permite que os gestores municipais tenham sensibilidade para direcionar os esforços para reduzir as emissões de GEE das principais fontes, assim como também limita o monitoramento das ações mitigatórias que venham a ser propostas por atividade de transporte. Portanto, é importante que as cidades brasileiras comecem a adotar a abordagem *bottom-up* para quantificação das emissões de transportes, visto que essa abordagem estabelece perfil de emissões categorizado por modos de transporte, permitindo implementação e monitoramento apropriado das ações mitigatórias.

O monitoramento de políticas climáticas tem recebido cada vez mais uma maior relevância mundialmente, principalmente em decorrência do papel crescente do processo de “Mensuração, Relato e Verificação” (MRV) das emissões, da necessidade de revisão das NDCs no âmbito do Acordo de Paris e da urgência da questão climática, que exige implementação de ações concretas. No Brasil, dentre as propostas relacionadas ao setor de transportes que compõem a NDC, estão: promover medidas de eficiência, melhorias na infraestrutura de transportes e no transporte público em áreas urbanas; e aumentar a oferta de etanol e da parcela de biodiesel na mistura do diesel. Tais medidas, na sua maioria, terão seus impactos no contexto urbano, ou seja, as cidades deverão contabilizar esses impactos. Diante disso, a abordagem mais apropriada para mensurar tais impacto é a *bottom-up*.

Portanto, é de extrema importância que as emissões do setor de transportes nas cidades brasileiras sejam contabilizadas de maneira eficaz e que permita um monitoramento do impacto das ações mitigatórias, destacando, assim, a relevância da atuação dos governos locais na agenda climática. Logo, a presente tese pretende auxiliar os governos locais na contabilização das emissões através da proposta de sistematização de um inventário *bottom-up* de emissões de GEE. Ainda, espera-se que esta sistematização seja uma ferramenta de apoio na tomada de decisão para direcionar apropriadamente medidas mitigatórias de GEE.

1.4. Procedimentos Metodológicos

Nesta seção são apresentados os métodos de pesquisa e de trabalho. No método de pesquisa são pontuadas as características da pesquisa, bem como o método utilizado. No método de trabalho são apresentados os procedimentos adotados para conduzir o desenvolvimento da tese.

1.4.1. Método de Pesquisa

Segundo a natureza da pesquisa, este trabalho caracteriza-se por possuir natureza aplicada, visto que busca gerar conhecimento (GIL, 2008) através da sistematização de inventário *bottom-up* de emissões de GEE para mobilidade urbana. Para tanto, utiliza métodos qualitativos e quantitativos para propor esta sistematização, que são utilizados alternadamente, dependendo da etapa do trabalho em análise.

Inicialmente é realizada a investigação das metodologias para inventário de emissões de GEE para cidades, o que revela um objetivo exploratório. Posteriormente, ao propor uma sistematização do inventário *bottom-up* tem-se o objetivo prescritivo, pois esta etapa está focada em apresentar um modelo adaptado a uma realidade específica ainda não abordada. Os procedimentos utilizados para condução do trabalho abrangem pesquisa bibliográfica e documental, entrevistas com especialistas e avaliação de estudo de caso.

1.4.2. Método de Trabalho

Para alcançar o objetivo da tese, a condução deste trabalho ocorre através de três etapas, as quais são apresentadas em formato de artigos. Cada um desses artigos apresenta um ou mais objetivos específicos necessários para alcançar o objetivo geral da tese. Para cada etapa e objetivo a ser alcançado, utiliza-se um método de trabalho específico. A estrutura do trabalho, os temas dos artigos, seus objetivos e métodos são apresentados na Tabela 1-1. É

importante destacar que os artigos 1 e 3, descritos na Tabela 1-1, são apresentados na versão de submissão aos periódicos internacionais e, portanto, os mesmos estão escritos em língua inglesa.

Tabela 1-1: Estrutura das etapas da pesquisa desenvolvida

Estudos	Objetivos	Questões de Pesquisa	Método de Pesquisa	Produto
Artigo 1 ^a	Análise exploratória para identificar metodologias para realização de inventários de GEE para cidades, verificar como as emissões de transportes são estimadas conforme as abordagens do IPCC e quais as fontes dos dados.	Quais metodologias para inventário de emissões de GEE a nível local estão sendo adotadas? Como as emissões de transportes são estimadas? Quais são as fontes dos dados?	Revisão sistemática seguindo método PRISMA (Moher, 2010)	Identificação das metodologias para quantificação de GEE a nível local; identificação das fontes dos dados para estimativa emissões <i>bottom-up</i> .
Artigo 2 ^b	Contextualizar a cidade para estudo de caso e avaliar o processo de elaboração do inventários: método adotado, periodicidade, responsáveis, quais as fontes dos dados.	Como é o processo de elaboração do inventário? Qual metodologia de inventário BH está adotando? Como as emissões de transportes são estimadas Quais são as fontes dos dados? A cidade tem plano mitigação? Como faz monitoramento?	Pesquisa Qualitativa: Entrevista semi-estruturada e análise documental	Histórico da elaboração do inventário; abordagem adotada para transportes; fontes dos dados.
Artigo 3 ^c	Propor uma sistematização de um inventário <i>bottom-up</i> de emissões de GEE para mobilidade urbana, propor avaliação qualitativa dos dados e recomendar melhorias para coleta dos dados.	Qual a disponibilidade e qualidade dos dados necessários para um inventário <i>bottom-up</i> ? Quais as lacunas no processo de elaboração de um inventário <i>bottom-up</i> ? Como superar essas lacunas?	Pesquisa Quantitativa e Qualitativa	Framework para sistematização de um inventário <i>bottom-up</i> .

(^a) Artigo publicado no periódico Environmental Impact Assessment Review; (^b) Artigo a ser submetido para Revista Sustentabilidade em Debate; (^c) Artigo a ser submetido para Transportation Research Part D

No Artigo 1 – *The evolution of a city-scale GHG Inventory methods: A systematic review* - a partir de uma revisão sistemática, que segue o protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) (MOHER et al., 2010), 40

artigos foram examinados para (i) identificar métodos de inventário de emissões de GEE em escala urbana aplicados nas cidades, (ii) avaliar como esses métodos estão evoluindo, (iii) determinar como as emissões de transporte são estimadas e (iv) avaliar quais são as fontes de dados adotadas para estimativa das emissões de transportes. Os resultados desta revisão sistemática mostram que muitas cidades estão desenvolvendo seus próprios métodos de inventário, adaptando os protocolos internacionais de acordo com a disponibilidade de seus dados. Embora os dados para estimar as emissões das atividades de transportes através da abordagem *bottom-up* sejam escassos, mais de 40% dos artigos revisados adotaram essa abordagem. Estes estudos coletaram dados de diversas fontes, tais como: registros estatísticos a nível nacional, regional e local; modelagens realizadas por modelos de transporte; pesquisas em campo; e extração de dados a partir de estudos existentes.

O Artigo 2 – **Desenvolvimento de inventários de emissões de gases de efeito estufa e seus impactos nas políticas climáticas locais** -, através de uma pesquisa qualitativa, teve como objetivo analisar o processo de inventário realizado em Belo Horizonte, assim como avaliar o impacto da elaboração do inventário para a redução das emissões de GEE na cidade, principalmente no setor de transportes. A pesquisa apresenta o histórico dos inventários e as políticas climáticas resultantes. Belo Horizonte elaborou 3 inventários de emissões no período de 2009 a 2015, estabeleceu uma meta de redução de 20% das emissões per capita até 2030, e tem como instrumento para direcionar ações de mitigação o Plano de Redução de Emissões de GEE. As emissões da mobilidade urbana, que contabilizam mais da metade das emissões totais da cidade, são estimadas através da abordagem *top down*. A análise sugere que departamentos responsáveis pela mobilidade urbana e meio ambiente invistam na contabilização mais desagregada das emissões da mobilidade urbana, visando desenvolver uma base de dados mais detalhada do perfil das emissões por modo de transporte, e que este sirva como ferramenta para direcionar as medidas do Plano de Mobilidade Urbana de Belo Horizonte.

O Artigo 3 – *Systematization of a GHG emissions inventory for urban mobility* – propõem uma sistematização de um inventário *bottom-up* de emissões de GEE, tendo como estudo de caso a cidade Belo Horizonte. Com base na avaliação qualitativa dos dados, proposta como parte da sistematização, os dados para transporte motorizado individual são, em geral, provenientes de fontes de baixa qualidade, consequentemente as melhorias nos métodos de coleta de dados para esses modos são necessárias. Outro ponto crítico que compromete um inventário de qualidade é a abrangência das emissões no limite da cidade,

principalmente em cidades de regiões metropolitanas. Identificadas as principais lacunas, são recomendadas algumas medidas para melhorar a qualidade dos dados. O inventário apresentado neste estudo, mesmo em uma versão simplificada da abordagem *bottom-up*, é um primeiro passo para a cidade ter um conhecimento mais detalhado da composição da frota no nível tecnológico, quilometragem média anual percorrida e padrões de consumo de combustível.

1.5. Delimitações do Trabalho

O trabalho está delimitado à quantificação de emissões de GEE para setor de transporte rodoviário urbano de passageiro, dessa forma não são considerados outros modos de transporte, como transporte urbano de carga, aéreo, marítimo e ferroviário. Quanto às emissões consideradas, se limita aos gases de efeito estufa Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄) e Óxido Nitroso (N₂O).

1.6. Estrutura do Trabalho

A tese está organizada em cinco capítulos principais. Neste primeiro capítulo foram apresentadas a contextualização do trabalho e os objetivos, justificando a importância desta pesquisa. Este capítulo também apresentou o método de trabalho, a estrutura e as delimitações do estudo. Os próximos três capítulos (2, 3 e 4) apresentam os artigos propostos, conforme a estrutura apresentada anteriormente na Tabela 1-1. O quinto capítulo encerra a tese, apresentando conclusões finais e recomendações para futuros estudos.

1.7. Referências

BALTAR DE SOUZA LEÃO, E. et al. Carbon accounting approaches and reporting gaps in urban emissions: An analysis of the Greenhouse Gas inventories and climate action plans in Brazilian cities. **Journal of Cleaner Production**, v. 245, n. xxxx, 2020.

CONVENANT OF MAYORS. **How to develop a Sustainable Energy Action Plan**, 2010. Disponível em: <http://www.eumayors.eu/IMG/pdf/seap_guidelines_en.pdf>

CREUTZIG, F. et al. Transport: A roadblock to climate change mitigation? **Science**, v. 350, n. 6263, p. 911–912, 2015.

CREUTZIG, F. et al. Upscaling urban data science for global climate solutions.

Global Sustainability, v. 2, n. January, 2019.

DAY, T., R, et al. . What the Paris Agreement means for global climate change mitigation. <https://newclimate.org/2015/12/14/what-the-paris-agreement-means-for-global-climate-change-mitigation/>. 2010

FIGUERES, C.; RIVETT-CARNAC, T. **The Future We Choose : Surviving the Climate Crisis**. [s.l: s.n.].

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. [s.l: s.n.].

GPC. **Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories**. [s.l: s.n.].

HUIZENGA, C.; BAKKER, S. Climate Instruments for the Transport Sector. n. November 2010, 2010.

IEA. **Policy Pathway A policy guide on how to transform cities by improving energy efficiency in urban transport systems**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Renewed_Cities_WEB.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2018.

IEA. **World Energy Outlook 2019 – Analysis - IEA**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>>. Acesso em: 17 mar. 2020.

IPCC. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol1.html>>. Acesso em: 21 jul. 2019.

KENNEDY, C. et al. Methodology for inventorying greenhouse gas emissions from global cities. **Energy Policy**, v. 38, n. 9, p. 4828–4837, 1 set. 2010.

LOMBARDI, M. et al. Assessing the urban carbon footprint: An overview. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 66, p. 43–52, 2017.

LUDERER, G. et al. Economic mitigation challenges: how further delay closes the door for achieving climate targets. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 3, p. 034033, 1 set. 2013.

MARTIRE, S.; MIRABELLA, N.; SALA, S. Widening the perspective in greenhouse gas emissions accounting: The way forward for supporting climate and energy policies at municipal level. **Journal of Cleaner Production**, v. 176, p. 842–851, 1 mar. 2018.

MI, Z. et al. Cities: The core of climate change mitigation. **Journal of Cleaner Production**, v. 207, p. 582–589, 10 jan. 2019.

MOHER, D. et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA Statement. **International Journal of Surgery**, v. 8, n. 5, p. 336–341, 2010.

NAGENDRA, H. et al. The urban south and the predicament of global sustainability. **Nature Sustainability**, v. 1, n. 7, p. 341–349, 2018.

ROCKSTRÖM, J. et al. A roadmap for rapid decarbonization. **Science**, v. 355, n. 6331, p. 1269–1271, 2017.

ROGELJ, J. et al. Probabilistic cost estimates for climate change mitigation. **Nature**, v. 493, n. 7430, p. 79–83, 2 jan. 2013.

ROGELJ, J. et al. **Energy system transformations for limiting end-of-century warming to below 1.5 °C** *Nature Climate Change*, 2015.

ROGELJ, J. et al. **Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C** *Nature*, 2016.

SCHIPPER, L.; MARIE-LILLIU, C.; GORHAM, R. **Flexing the link between Transport and Greenhouse Gas Emissions** *International Energy Agency*. Paris, France: [s.n.]. Disponível em: <<https://trid.trb.org/view.aspx?id=851906>>.

SEEG, 2019. **Análise das Emissões Brasileiras de Gases de Efeito Estufa e suas implicações para as metas do Brasil** 1–33.

SCHLEUSSNER, C.-F. et al. Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. **Nature Publishing Group**, v. 6, 2016.

VIEWEG, M. **Bottom-Up GHG Inventory and MRV of Measures**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://transferproject.org/wp-content/uploads/2017/09/Bottom-Up-Inventory-and-MRV-of-Transport-Measures.pdf>>. Acesso em: 9 nov. 2017.

WAISMAN, H. et al. A pathway design framework for national low greenhouse gas emission development strategies. **Nature Climate Change**, v. 9, n. 4, p. 261–268, 2019.

WALDRON, C. D. et al. Chapter 3: Mobile Combustion. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, p. 1–78, 2006.

WALSH, B. et al. Pathways for balancing CO₂ emissions and sinks. **Nature Communications**, v. 8, 2017.

WORLD BANK; UN-HABITAT; UNEP. **Draft International Standard for Determining Greenhouse Gas Emissions for Cities**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://siteresources.worldbank.org/INTUWM/Resources/GreenhouseGasStandard.pdf>>.

XUNZHANG, P. et al. China's energy system transformation towards the 2°C goal: Implications of different effort-sharing principles. **Energy Policy**, v. 103, p. 116–126, 2017.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os inventários de emissões de GEE são um dos principais instrumentos de combate às mudanças climáticas pois fornecem informações que permitem direcionar os investimentos públicos para os setores que mais contribuem para tais externalidades. A partir da caracterização das emissões de GEE é possível estabelecer metas de redução a serem atingidas através dos planos de mitigação. Tendo em vista a contribuição das emissões de GEE de transportes nas cidades brasileiras e a importância da realização de um inventário como ferramenta para elaboração de uma política climática, este estudo teve como objetivo propor uma sistematização um inventário *bottom-up* de emissões de GEE para mobilidade urbana, tendo como estudo de caso a cidade de Belo Horizonte.

A construção da tese ocorreu através da elaboração de três artigos. Cada artigo contribuiu, por meio dos objetivos específicos propostos, para o objetivo geral da tese. No primeiro artigo, através de uma revisão sistemática, identificou-se como as emissões de GEE de transportes são estimadas (abordagem *top down* ou *bottom-up*) e quais são as fontes destes dados. No artigo 2, por meio de uma pesquisa qualitativa, o processo de elaboração de inventários de emissões de GEE em Belo Horizonte foi analisado, assim como foram coletadas informações para contextualizar o cenário do estudo de caso. Para então, no artigo 3, propor uma sistematização de um inventário *bottom-up* de emissões de GEE para mobilidade urbana.

A sistematização proposta nesse estudo, com base numa versão simplificada *bottom-up* extraída da revisão sistemática (capítulo 2), é composta por 6 etapas: (i) caracterização da área de estudo; (ii) definição métodos, variáveis para estimativa das emissões e definição da área de abrangência das emissões; (iii) coleta e tratamento dos dados; (iv) avaliação qualitativa dos dados; (v) processo de validação do inventário; e (vi) resultado das emissões de GEE da mobilidade urbana. Este processo de elaboração é muito mais rígido e complexo se comparado com a abordagem *top down*.

O inventário de emissões de GEE, apresentado no capítulo 4, exigiu um intenso trabalho de coleta e tratamento dos dados, análise crítica dos dados e validação para obtenção do resultado das emissões de GEE da mobilidade urbana de BH. Cada etapa que compõem a sistematização proposta apresentou suas particularidades que possibilitaram identificar os desafios e pontos críticos a serem aprimorados para elaboração deste inventário. Alguns dos

desafios encontrados no processo já são reportados na literatura, mas este estudo buscou aprofundar tais desafios para o contexto de Belo Horizonte possibilitando que seja extrapolado para a realidade de outras cidades brasileiras com o perfil similar.

O primeiro ponto crítico observado é na etapa 2: definição da área de abrangência das emissões, ou seja, determinar o limite geográfico das externalidades dos deslocamentos motorizados no município. Tal alocação das emissões no limite da cidade é extremamente desafiador, principalmente no contexto de grandes centros urbanos que contempla inúmeros deslocamentos diários entre os municípios da região metropolitana. A sistematização, no caso específico de BH, propôs um híbrido do método geográfico, que considera as emissões que ocorrem somente no território da cidade, e do método de atividades dos residentes da cidade, que considera deslocamentos dos residentes com destino em outro município.

A tentativa de limitar as emissões de GEE apenas ao espaço geográfico do município ressaltou a complexidade de retratar o perfil dessas emissões, que dificilmente apresentarão um resultado próximo da realidade. Logo, nas cidades com região metropolitana é altamente recomendável que a região como um todo elabore o inventário de emissões de GEE, assim como um plano conjunto de ações de mitigação, ressaltando a importância do planejamento integrado entre a capital e região metropolitana.

Outro desafio examinado no processo da sistematização é em relação aos dados, tanto na disponibilidade como na qualidade dos mesmos. Tendo em vista que este é um ponto crítico para elaboração de um inventário *bottom-up*, a sistematização propõem uma avaliação qualitativa com intuito de classificar os dados coletados e tratados. Os critérios adotados para esta avaliação – acurácia, constância e disponibilidade - foram determinados com base do que se espera de um dado para seja possível elaborar um inventário eficaz e que permita um monitoramento periódico das emissões de GEE.

A avaliação qualitativa permitiu uma análise mais crítica e sensível acerca do nível da qualidade do dado e do quanto este dado pode influenciar o resultado final das emissões. Através desta avaliação, identificou-se que os dados adotados para quantificar as emissões para o transporte motorizado individual apresentam, em geral, baixa qualidade, contrastando com os dados de alta qualidade do transporte público. As maiores incertezas dos dados para transporte motorizado individual são decorrentes da composição da frota de automóveis e motocicletas, desde o perfil da frota ao número da frota circulante; e padrão de consumo. Isto reflete o desafio de caracterizar as viagens por modo motorizado individual, principalmente em cidades de grande porte como Belo Horizonte. Tendo em vista a grande representatividade

das emissões resultantes do transporte motorizado individual fica evidente a necessidade de aprimoramento da qualidade do dado para esse modo.

No capítulo 4, são apresentadas sugestões que podem contribuir para qualificar o conjunto de dados necessários para a elaboração de inventários. Não existe uma única ação que que viabilize a obtenção de todos os dados necessário para a elaboração dos inventários de uma cidade ou região metropolitana. Assim, os esforços devem ser direcionados para melhorar os dados que carecem de mais qualidade, conforme a avaliação qualitativa dos dados proposta na etapa 4 da sistematização.

No contexto de Belo Horizonte, sugere-se que a adoção de um conjunto de ações pode contribuir para a melhoria dos dados sobre transporte motorizado individual como: (i) a inspeção veicular contribui para a obtenção de dados mais realistas sobre a composição da frota; (ii) registro atualizado da frota circulante com auxílio dos dados do seguro DPVAT; e (iii) dados da distância anual podem ser obtidos através de tecnologias de Big Data. Essas recomendações são propostas para o cenário de Belo Horizonte, mas podem ser adotadas por outras cidades brasileiras que carecem de dados de qualidade do transporte motorizado individual.

O último ponto crítico identificado e também considerado o ponto crucial da sistematização é a etapa da validação. Esta etapa consiste na comparação do volume dos combustíveis – gasolina, etanol e diesel - obtidos através da abordagem *bottom-up* com o volume dos mesmos combustíveis coletados para cálculo das emissões através da abordagem *top down*. Tal comparação foi essencial para determinar o *market share* do etanol na frota de veículos flex. Diante da expressiva frota de veículos *flex* e ao uso de biocombustíveis no Brasil, se torna um quesito particular na elaboração de um inventário *bottom-up* nas cidades brasileiras definir a participação do consumo do etanol na frota de veículos flex. Dada as variações do preço do etanol em comparação ao preço da gasolina, o *market share* está constantemente vulnerável às oscilações do mercado. A forma adotada nessa sistematização é uma tentativa de retratar participação do etanol; porém, devem ser desenvolvidos outros meios alternativos para auxiliar na determinação do *market share*.

A sistematização de um inventário *bottom-up* de emissões de GEE proposta nesta tese não fornece apenas o perfil das emissões de GEE proveniente das atividades de mobilidade urbana, que podem auxiliar na tomada de decisão e na definição de medidas mitigatórias de GEE. A base de dados elaborada para estimativa das emissões é um primeiro passo para o conhecimento mais detalhado da composição e características tecnológicas da frota, da

quilometragem média anual percorrida, do consumo médio dos veículos e da influência da adoção de biocombustíveis no balanço das emissões de GEE. Informações com tal nível de detalhamento são importantes para que as cidades estejam preparadas para acompanhar os impactos das tendências mundiais na mobilidade urbana, como a introdução dos carros elétricos e a nova relação com posse de veículo decorrente dos aplicativos de viagens compartilhadas como Uber.

A elaboração de inventários de emissões de GEE para mobilidade urbana a partir da abordagem *bottom-up* permite que os gestores locais tenham a sensibilidade de mensurar as ações de mitigação de GEE adotadas. Tais ações de mitigação poderão ser provenientes dos planos municipais, estaduais e do comprometimento do Brasil no âmbito do Acordo de Paris, através da NDC, que inclui adoção de medidas para melhorar eficiência energéticas dos automóveis e aumento da participação dos biocombustíveis.

Tem-se muito que fazer em tão pouco tempo para manter as projeções das emissões de GEE alinhadas às metas do Acordo de Paris. Os governos locais podem e devem ocupar o papel de protagonistas na agenda climática, especialmente nos países nos quais o engajamento a nível nacional pode ser incerto e tendencioso aos interesses de quem está no poder. Uma política climática voltada para mobilidade urbana sustentável e de baixo carbono tem muito a contribuir, e o primeiro passo para começar a agir é através da contabilização das emissões de GEE.

Recomendação para trabalhos futuros

Diante dos desafios apresentados e extrapolados ao longo dessa tese, recomenda-se que futuras pesquisas devam ser conduzidas para avaliar como a abertura de dados de tecnologias disruptivas, como *ride-hailing*, assim como outras fontes de big data podem auxiliar na elaboração de um inventário *bottom-up* através do fornecimento de dados.

Ressalta-se ainda a necessidade de buscar formas alternativas para determinar o *market share* da participação do etanol no consumo da frota de veículos flex. Talvez possa ser explorado novas tecnologias, principalmente por meio da Internet das Coisas (IoT) no âmbito de Cidades Inteligentes.

Por fim, diante do padrão de consumo atual, no qual as compras por meio do comércio eletrônico crescem continuamente, e assim acarretam num aumento relacionado às entregas de mercadorias, destaca-se a importância de incorporar à sistematização proposta a contabilização do transporte de carga urbana.