

**Estimativa de redução das emissões atmosféricas resultante da
implantação do Plano de Mobilidade Urbana de Belo Horizonte**

RELATÓRIO FINAL



**instituto de energia
e meio ambiente™**

Diretor Presidente

André Luís Ferreira

Equipe Técnica

André Luís Ferreira
David Shiling Tsai
Renato Boareto

Apoio

Edgar Calligari Pires
Marcelo dos Santos Cremer

João Lotti (Engenharia e Consultoria Ltda.)



Presidente

Ramon Victor Cesar

Diretor de Planejamento

Célio Freitas Bouzada

Equipe Técnica

Marcelo Cintra do Amaral
Rodrigo Sandro dos Anjos

Julho de 2014

Sumário

1. Introdução.....	4
2. O Plano de Mobilidade Urbana de Belo Horizonte	6
2.1. Cenários para a rede de transporte considerados no PlanMob BH.....	6
3. Metodologia	12
3.1. Definições de escopo	12
3.2. Identificação do conteúdo da base de dados de modelagem de transporte.....	13
3.3. Formulação do algoritmo de cálculo de emissões	14
3.4. Espacialização das emissões	17
3.5. Fontes de informação para fatores de emissão e parâmetros de consumo de combustível 17	
3.5.1. Parâmetros de consumo de combustível por quilômetro em função da velocidade ...	18
3.5.2. Fatores de emissão	19
4. Resultados.....	24
4.1. Consumo de combustíveis.....	24
4.2. Emissões de material particulado (MP ₁₀)	25
4.3. Emissões de óxidos de nitrogênio (NO _x)	28
4.4. Emissões de hidrocarbonetos não-metano (NMHC).....	30
4.5. Emissões de dióxido de carbono (CO ₂)	32
5. Conclusões e recomendações.....	35
6. Referências	38

1. Introdução

Em sua história recente, o Brasil tem observado profundas mudanças na economia e na sua sociedade, destacando-se o intenso processo de industrialização e urbanização que teve início ainda nos anos 50. Tal processo veio, em geral, acompanhado de uma gestão da mobilidade urbana centrada na maximização da fluidez dos veículos particulares, produzindo um ciclo de dependência do uso do automóvel, com conseqüente pressão sobre o uso dos escassos espaços urbanos, crescente estigmatização do transporte público e dos modais não motorizados, bem como degradação do espaço urbano. A cidade passa a ter suas áreas destinadas cada vez mais à circulação e guarda de veículos ao invés da promoção de atividades de lazer e convivência. O resultado é um sistema de mobilidade socialmente excludente e economicamente ineficiente. Além disso, os padrões de mobilidade urbana vêm causando importantes impactos ambientais, destacando-se principalmente a poluição atmosférica e as emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Com exceção de casos em que grandes fontes industriais de poluentes atmosféricos se encontram presentes, a poluição do ar nos centros urbanos é majoritariamente ocasionada pelo transporte de pessoas e cargas. Segundo a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2005), as altas concentrações de poluentes na atmosfera situam-se entre as principais causas de problemas respiratórios e cardiovasculares. No Brasil, estudos reforçam o papel da poluição do ar como vetor dos problemas de saúde pública, com maiores custos sobre o sistema de saúde do país (Olmo et al., 2011, Miranda et al., 2012).

Sob a perspectiva ambiental, um importante desafio que se apresenta para a mobilidade urbana é a combinação de medidas que atendam às necessidades de deslocamento das pessoas ao mesmo tempo que reduzam as emissões de poluentes atmosféricos que degradam a qualidade do ar e evitem as emissões de gases de efeito estufa, apontados como causa das mudanças climáticas globais. Neste sentido, a redução dos deslocamentos em modos motorizados e a realização dos deslocamentos em modos de transporte mais eficientes devem ser consideradas como estratégias de redução de emissões. É com esta orientação que este trabalho foi desenvolvido.

A Política Nacional de Mobilidade Urbana, instituída pela Lei nº 12.587/2012 estabelece em seu artigo 24 a elaboração do Plano Municipal de Mobilidade Urbana para as cidades com mais de 20 mil habitantes, como condição para o acesso a recursos federais destinados à mobilidade urbana a partir de abril de 2015. Esta lei tem relação com outras políticas nacionais recentemente aprovadas, com destaque para a Política Nacional de Mudanças Climáticas, instituída por meio da Lei Federal nº 12.187/2009. Esta lei estabelece atribuições complementares entre as três esferas de governo par a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Estas duas políticas nacionais, por sua vez, estão relacionadas aos esforços necessários para a promoção da melhoria da qualidade do ar, principalmente nos grandes centros urbanos.

Quando elaborados e implementados com vistas a promover a transferência modal do transporte individual motorizado para o transporte coletivo e para meios não motorizados de transporte, os Planos Municipais de Mobilidade Urbana se prestam também à promover a melhoria da qualidade ar e a redução das emissões de gases de efeito estufa nos centros urbanos. Este é o caso do Plano de Mobilidade Urbana de Belo Horizonte, que propõe a gestão da demanda como estratégia principal para a melhoria do sistema de mobilidade urbana, combinando um conjunto de projetos

de infraestrutura para o transporte coletivo e não motorizado com medidas de regulação do uso do transporte individual.

Pautando-se na abordagem de integrar os planos municipais de mobilidade urbana à gestão da qualidade do ar e à estratégia de redução de emissões de GEE, o Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) e a Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte S/A (BHTrans) elaboraram este estudo, cujo objetivo é estimar o potencial de redução de emissões atmosféricas que a implantação do PlanMob-BH pode proporcionar para a cidade. Este trabalho estima a redução do consumo de combustíveis e das emissões atmosféricas para cada um dos cenários considerados no Plano de Mobilidade Urbana de Belo Horizonte

2. O Plano de Mobilidade Urbana de Belo Horizonte

O PlanMob BH, desenvolvido entre março de 2008 a agosto de 2010, apresenta caráter de Plano Diretor, com definições estratégicas expressas em políticas, ações e projetos. Seus principais objetivos incluem:

- Contribuir para a sustentabilidade econômica, social e ambiental, considerando todos os modos de transporte e com foco na competitividade da cidade e melhoria da qualidade de vida;
- Valorizar os sistemas de transporte coletivo e não motorizado, estimulando a utilização desses modos mais eficientes em termos ambientais e energéticos;
- Elaborar carteira de projetos e políticas públicas para os horizontes de curto, médio e longo prazo, que servirão de referência para as ações a serem implementadas nas componentes do sistema de mobilidade;
- Introduzir instrumentos de monitoramento de resultados dinâmicos (tipo observatório), garantindo a revisão do processo de planejamento.

2.1. Cenários para a rede de transporte considerados no PlanMob BH

O PlanMob BH, ao trazer propostas de medidas para a melhoria da mobilidade urbana em Belo Horizonte, avaliando os seus impactos, considera quatro situações para a rede de transporte da cidade:

- 1) A rede de transporte existente em (2008), chamada **Atual**;
- 2) A rede de transporte em 2014, ao receber os investimentos previstos para a Copa do Mundo de Futebol em 2014, chamada de **Copa 2014**;
- 3) A rede transporte em 2020, ao receber investimentos adicionais restritos (contemplando apenas uma parcela das medidas propostas pelo PlanMob BH), chamada de **Restrição de Investimento (RI)**;
- 4) A rede de transporte em 2020, ao receber investimentos plenos (contemplando todas as medidas propostas pelo PlanMob BH), chamada de **Investimento Pleno (IP)**.

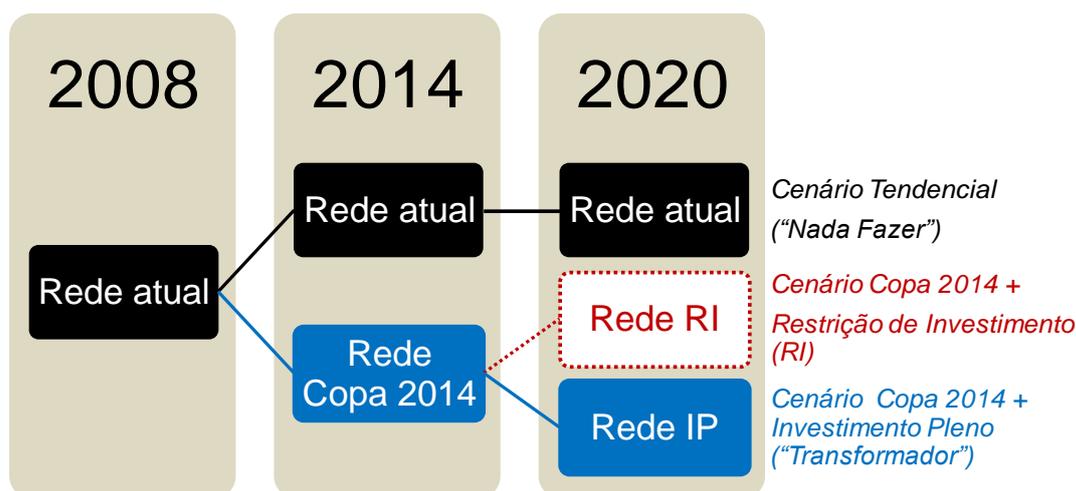
Estas quatro situações para a rede de transporte são consideradas em 3 cenários de evolução da rede, partindo de 2008 como ano base e tomando os anos 2014 e 2020 como referências futuras:

- 1) **Cenário Tendencial** ou “**Nada Fazer**”: a rede de transporte de 2008 se mantém inalterada até 2020.
- 2) **Cenário 2020 com Restrição de Investimentos (2020 RI) (Copa 2014 + Restrição de Investimentos)** a rede de transporte de 2008 recebe os investimentos previstos para a Copa em 2014, e investimentos adicionais restritos, que possibilitam apenas a implantação de uma parcela das medidas propostas pelo PlanMob BH até 2020.

- 3) **Cenário 2020 com Investimentos Plenos (2020 IP) ou Cenário Transformador (Copa 2014 + Investimento Pleno)** a rede de transporte de 2008 recebe os investimentos previstos para a Copa em 2014 e investimentos adicionais plenos, que possibilitam a implantação de todas as medidas propostas pelo PlanMob BH até 2020.

A Figura 1 ilustra a evolução da rede de transporte para os anos 2008, 2014 e 2020 nos cenários Tendencial, Restrição de Investimentos e Transformador.

Figura 1: Redes de transporte e cenários de evolução considerados no PlanMob BH



A Tabela 1 mostra sinteticamente as dimensões da infraestrutura e medidas propostas no PlanMob BH para cada situação de rede de transporte considerada.

Tabela 1: Dimensões da infraestrutura e medidas propostas no PlanMob BH para cada situação de rede de transporte futura considerada

Situação de rede	Copa 2014	Restrição de Investimento	Investimento Pleno
Ano	2014	2020	2020
BRT	73,7 km	+65,7 km (total de 139,4 km)	+85,8 km (total de 159,5 km)
Metrô	Aumento da capacidade na Linha 1 (28,5km existentes)	+16 km (Total de 44,5km) (Linhas 1, 2 e 3)	+ 31,6 km (Linhas 2 e 3) (total de 60,1Km)
Bicicleta	105 km	+94km (total de 199km)	+231km Total de 336km)
Desestímulo ao uso do automóvel	-	-	Rodízio de placas, política de estacionamento na área central
Transit Oriented Development	-	-	Adensamento (44% do crescimento populacional ao longo do transporte coletivo)
Calçadas	Pacote 1	Pacote 2	Pacote 3
Obras viárias	Pacote 1 (VIURBS)	Pacote 2 (VIURBS)	Pacote 3 (VIURBS)

Partindo de uma rede de transporte em 2008 na qual inexistia qualquer sistema de *Bus Rapid Transit* (BRT)¹, a rede de transporte **Copa 2014** apresenta uma infraestrutura de BRT proposta cuja extensão soma 73,7 km. Esta rede proposta considera também o aumento da capacidade do serviço de metrô de 2008 (em seus 28,5 km existentes numa única linha), a implementação de uma estrutura cicloviária de 105 km, melhorias em calçadas e um pacote de obras viárias contidas no Programa de Estrutura Viária de Belo Horizonte (VIURBS)² destinadas a promover a melhoria da circulação do transporte público..

Sobre a rede **Copa 2014**, são acrescidos investimentos adicionais para caracterizar a rede **Restrição de Investimento**, onde seriam construídos mais 65,7 km de infraestrutura de BRT, 16 km de metrô (incluindo a criação de duas novas linhas, totalizando 44,5 km), 94 km de estrutura cicloviária (totalizando 199 km), melhorias em calçadas e outro pacote de obras viárias contidas no VIURBS.

Por último, a rede **Investimento Pleno** é projetada a partir da rede **Restrição de Investimento**, com a construção de mais 85,8 km de infraestrutura de BRT (totalizando 159,5 km), 31,6 km de metrô (totalizando 60,1 km), 231 km de estrutura cicloviária (totalizando 336 km), melhorias em calçadas, ainda outro pacote de obras viárias contidas no VIURBS, medidas de desestímulo ao uso do automóvel (rodízio de placas e política de estacionamento na área central) e medidas de intervenção no uso e ocupação do solo, com o objetivo de promover a alocação de 44% do crescimento populacional previsto para os próximos anos ao longo de eixos de transporte coletivo

Os Gráficos 1, 2 e 3, a seguir, mostram (1) a evolução da divisão modal – mensurada em termos de passageiros-quilômetro³ –, (2) a produção de transporte por ônibus e por automóveis – também expressa em termos de passageiros-quilômetro – e (3) as distâncias totais percorridas por ônibus e por automóveis – na unidade veículos-quilômetro⁴ –, respectivamente, nos Cenários Tendencial e Transformador, na hora-pico-manhã⁵. Estes gráficos foram gerados a partir da base de dados que contém os resultados da modelagem de transporte e que foi cedida ao IEMA pela BHTrans, como será visto na seção 3 sobre metodologia.

¹ O Bus Rapid Transit de Belo Horizonte é um sistema de transporte formado por via segregada para operação de ônibus articulado, embarque e desembarque em estações niveladas com o piso dos ônibus, pré-pagamento da passagem nas estações, controle informatizado da operação no corredor e informação em tempo real para o usuário

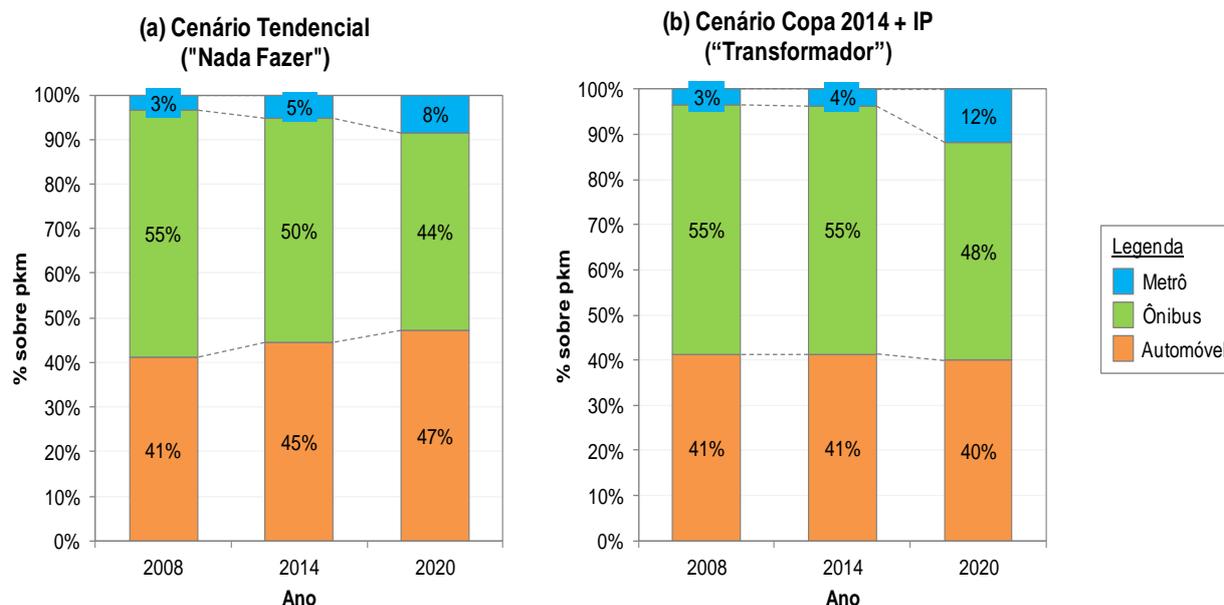
² O VIURBS pode ser acessado no site da BHTrans, www.bhtrans.com.br

³ A variável passageiro-quilômetro (pkm) expressa o número de quilômetros viajados por uma pessoa, num determinado período de tempo, usando certo modo de transporte.

⁴ A variável veículo-quilômetro (vkm) expressa o número de quilômetros viajados por um veículo, num determinado período de tempo.

⁵ Hora-pico-manhã é o período de uma hora durante o período matutino no qual se concentra o maior número de viagens realizadas pelas pessoas numa cidade, havendo conseqüentemente a maior demanda pelo uso do espaço viário. É um conceito usado nos estudos de planejamento de transporte.

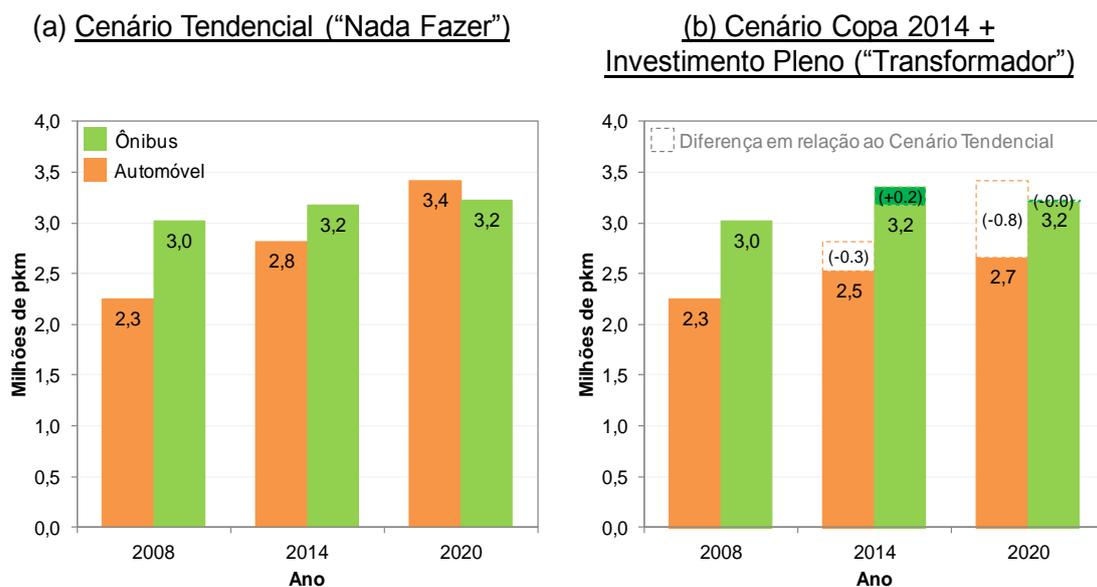
Gráfico 1: Divisão modal (sobre pkm) na hora-pico, nos cenários (a) Tendencial e (b) Transformador



O Gráfico 1 mostra que no Cenário Tendencial, onde não há novos investimentos na rede de transporte de Belo Horizonte, a participação dos ônibus na divisão modal diminui enquanto aumenta a participação do automóvel, quando consideradas as viagens motorizadas. Enquanto o ônibus configurava o modo de transporte principal em 2008 (respondendo por 55% da produção de transporte enquanto os automóveis respondiam por 41%), o automóvel tomaria este posto em 2020 (respondendo por 47% da produção de transporte enquanto os ônibus responderiam por 44%). Observa-se também um crescimento da participação do metrô, apesar da ausência de investimentos na expansão deste modo, o que indica um aumento da utilização da linha existente, com a melhoria da oferta. Já no Cenário Transformador, a relação entre transporte coletivo (metrô e ônibus) e transporte individual (automóveis) se manteria em patamares constantes próximos a 60 : 40, mas com destaque para o aumento da participação do metrô (de 3% em 2008 para 12% em 2020).

Em termos absolutos, o Gráfico 2 nos traz a informação da quantidade de passageiros-quilômetro transportados por ônibus em por automóveis, nos Cenários Tendencial e Transformador.

Gráfico 2: Passageiros-quilômetro na hora-pico-manhã, nos cenários (a) Tendencial e (b) Transformador



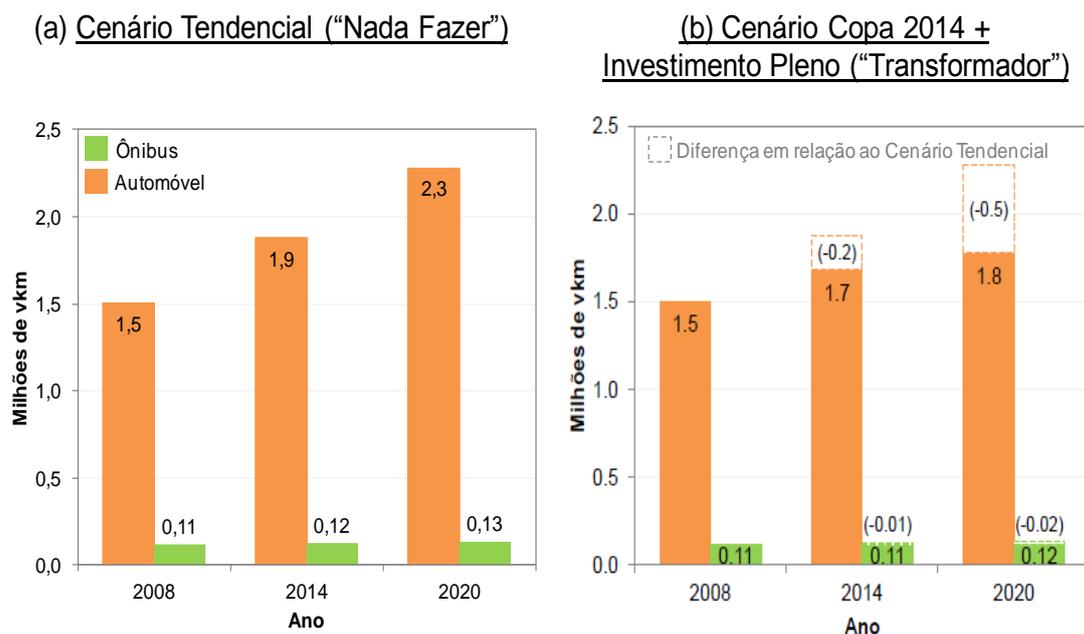
No Cenário Tendencial há crescimento do transporte individual, que passaria de 2,3 milhões de pkm em 2008 para 3,4 milhões de pkm, um aumento de 48% em 12 anos. As viagens em ônibus também aumentam no Cenário Tendencial, porém mais lentamente, saindo de 3,0 milhões de pkm em 2008 para 3,2 pkm em 2020. Neste cenário, como é de se esperar, haveria a inversão na participação dos modos na produção de pkm, com o automóvel assumindo a dianteira.

O crescimento das viagens de automóvel verificado no Cenário Tendencial é desacelerado no Cenário Copa 2014, passando de 2,3 milhões de pkm em 2008 para 2,5 milhões de pkm. O pkm produzido pela frota de ônibus também cresceria 0,2 milhões neste período. No Cenário 2020 com Investimento Pleno, a frota de automóveis produziria 2,7 milhões de pkm, que representa um aumento de 0,2 milhões de pkm em relação ao ano base de 2008, mas uma redução de 0,8 milhões de pkm, quando comparado ao Cenário Tendencial. A participação da frota de ônibus praticamente não sofreria alterações, uma vez que neste cenário será expressivo o aumento da participação do metrô no transporte coletivo e da bicicleta⁶.

O objeto de trabalho deste estudo são as emissões de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa do sistema de mobilidade urbana, resultantes do uso e da circulação dos veículos e não dos passageiros-quilômetro. Deste modo, os veículos-quilômetros (vkm) cujas estimativas são apresentadas no Gráfico 3, é uma variável trabalhada nos modelos de transporte que mais nos aproxima da estimativa de emissões.

⁶ O PlanMob-BH prevê que a participação da bicicleta na divisão modal da cidade, no Cenário 2020 Investimento Pleno, atinja 6%.

Gráfico 3: Veículos-quilômetro na hora-pico-manhã, nos cenários (a) Tendencial e (b) Transformador



O Gráfico 3 mostra que as distâncias totais percorridas por automóveis, expressas pelo vkm (veículo-quilômetro), são de 1,5 milhão de vkm em 2008. A frota de ônibus produz 0,11 milhão de vkm para o mesmo ano, o que equivale a menos de 10% da distância percorrida pela frota de automóveis. Estes resultados são compreensíveis, uma vez que os ônibus transportam dezenas de vezes mais pessoas por veículo na hora-pico, quando comparado com um automóvel. No Cenário Tendencial, a frota de automóveis produziria 2,3 milhões de vkm em 2020, o que representa um aumento da ordem de 54% em relação ao ano base de 2008. A frota de ônibus teria um pequeno aumento, passando de 0,11 milhão de vkm para 0,13 milhão de vkm.

No Cenário Transformador, uma parcela considerável das viagens de automóveis poderia ser evitada. Com os investimentos previstos, as distâncias percorridas pela frota de automóveis atingiriam 1,8 milhão de vkm em 2020, um crescimento de 0,3 milhão de vkm em relação ao ano base de 2008. Porém, quando comparado com o Cenário Tendencial, haveria uma redução da ordem de 0,5 milhão de vkm. No caso dos ônibus, haveria um crescimento de 0,1 milhão de vkm em relação ao ano base de 2008, porém este número é 0,02 milhão de vkm menor que o previsto no Cenário Tendencial. Esta redução de vkm da frota de ônibus pode ser resultado das mudanças operacionais e das características dos veículos, que serão promovidas para a implantação dos BRTs na cidade.⁷

⁷ Para a implantação dos BRTs pode haver a regionalização das linhas de ônibus, com o seccionamento de itinerários ou mesmo a supressão de linhas nos eixos de transporte, e a operação com veículos articulados de maior capacidade, substituindo ônibus convencionais.

3. Metodologia

As emissões atmosféricas de fontes fixas e móveis são estimadas a partir da seguinte equação geral:

$$E = A \times Fe$$

Onde:

- E são as emissões a serem estimadas;
- A é a taxa de atividade da fonte emissora;
- Fe é o fator de emissão da fonte emissora.

No caso de emissões veiculares, a taxa de atividade (A) pode ser expressa, por exemplo, pela distância percorrida por um veículo (em quilômetros) por ano e o fator de emissão (Fe) pode ser expresso em gramas de gás ou partículas emitidos por quilômetro rodado. Como resultado as emissões (E) seriam calculadas em gramas de gás ou partículas emitidos por ano.

Neste estudo em particular, a proposta é aplicar tal método geral de estimativa de emissões, aplicando-se os fatores de emissão (Fe) mais adequados sobre uma base de dados de atividade (A) gerada pela modelagem de transporte desenvolvida para a elaboração do PlanMob BH.

3.1. Definições de escopo

Como pré-definição, este exercício de estimativa de emissões não entra no mérito de avaliar a modelagem de transporte que serviu à elaboração do PlanMob BH. Portanto, são tomadas como base as mesmas delimitações de escopo, as demais características inerentes desta modelagem e seus resultados. Estas bases incluem as seguintes considerações:

- (i) O universo de viagens de passageiros passíveis de representação restringe-se àquele que a Pesquisa Origem-Destino de Belo Horizonte (OD)⁸ foi capaz de caracterizar. Destaca-se que, em pesquisas OD, as viagens por automóvel, principalmente as eventuais, são comumente subdeclaradas, assim como as viagens de táxi. Os não-moradores (visitantes) do município e as viagens de motoristas de empresas (“viagens de serviço”) estão fora do escopo da pesquisa.
- (ii) O universo de viagens efetivamente representadas na modelagem de transporte é um subconjunto daquelas oriundas da Pesquisa OD e sua expansão⁹. O universo original de viagens caracterizadas na Pesquisa OD é simplificado quando retratado no modelo de

⁸ A Pesquisa Origem e Destino constitui-se em elemento central das atividades de planejamento de transporte. Tem por objetivo o levantamento do volume e das características atuais dos deslocamentos realizados pela população em suas atividades diárias, em uma aglomeração urbana. Esse levantamento procura estabelecer relações quantitativas entre as viagens realizadas, motivos, modo de transporte e diversas outras variáveis, como características sócio-econômicas, aspectos físicos e urbanos da ocupação, de forma a estabelecer projeções futuras para os desejos de deslocamentos da população.

⁹ Os dados obtidos na pesquisa aplicada em uma amostra de domicílios de determinada zona são expandidos para a totalidade da população existente naquela zona da forma mais realista possível.

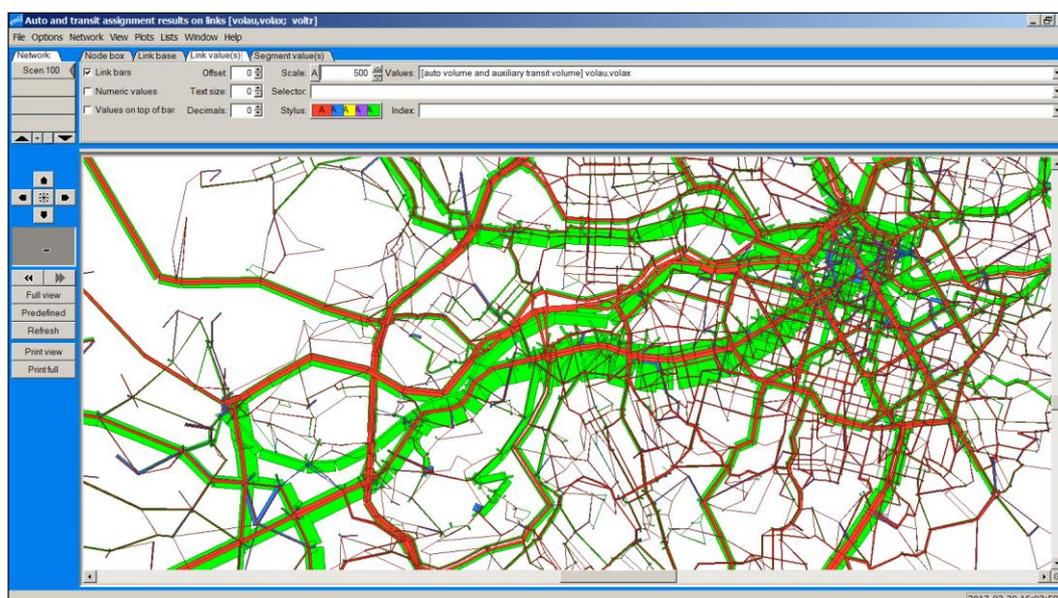
transporte, pois, no caso de Belo Horizonte, não considera as viagens intrazonais¹⁰, as viagens por motocicleta e o transporte coletivo privado (ônibus fretados).

- (iii) A modelagem de transporte tem como escopo de análise o período de uma hora, a hora-pico-manhã, uma vez que este é o período durante o dia no qual se concentra o maior número de viagens simultâneas realizadas pelas pessoas numa cidade, havendo conseqüentemente a maior demanda pelo uso do espaço viário e dos meios de transporte coletivo. Considera-se a hora-pico-manhã nos estudos de planejamento dado que o sistema deve ser projetado para suportar esta demanda máxima.
- (iv) O transporte urbano de cargas não é objeto de estudo do PlanMob BH e conseqüentemente não consta caracterizado no modelo de transporte e na estimativa de emissões.

3.2. Identificação do conteúdo da base de dados de modelagem de transporte

O primeiro passo para estimar as emissões foi conhecer e extrair os resultados da modelagem de transporte realizada para o PlanMob BH. A modelagem foi feita com o auxílio do software proprietário EMME/2, desenvolvido pela empresa canadense INRO. No presente estudo, apenas um banco de dados dos resultados desta modelagem foi utilizado, o qual pôde ser trabalhado a partir do software livre ENIF, que permite acessar bancos de dados produzidos pelo EMME/2 a partir de uma interface gráfica com o usuário¹¹ (Figura 2).

Figura 2: Exemplo de tela do programa ENIF com a rede viária e o carregamento de veículos



¹⁰ A zona de tráfego é resultado da divisão da cidade em setores de pesquisa, normalmente coincidentes com os setores estabelecidos para a realização do censo populacional. A cada setor é atribuído um centróide, considerado o ponto de origem ou destino da viagem desta zona em relação à outra zona de tráfego. As viagens que ocorrem dentro de uma mesma zona de transporte podem não ser registradas na pesquisa O/D.

¹¹ O ENIF não foi desenvolvido para substituir o EMME/2, mas sim para coexistir com o EMME/2 e complementá-lo (Spiess, 2000).

Os elementos fundamentais dos modelos de simulação de transporte são aqueles das redes, quais sejam os *links* (ligações em inglês) e os nós. Nos modelos de transporte, os *links* representam um segmento da malha viária possuindo determinadas características como: coordenadas geográficas, forma, extensão, o fluxo de veículos por tipo, a capacidade de fluxo de veículos por tipo, o fluxo de passageiros por tipo de veículo, o sentido de fluxo e a velocidade dos veículos. Os nós constituem as extremidades dos *links* ou o encontro entre dois ou mais *links*.

No caso do banco de dados da modelagem de transporte do PlanMob BH, os resultados são apresentados para duas categorias separadamente (em duas matrizes): automóveis e transporte coletivo. A Figura 3 mostra os campos e atributos nos quais se apresentam estas matrizes.

Figura 3: Conteúdo das matrizes de resultados da modelagem de transporte do PlanMob BH

Resultados para automóveis	Resultados para o transporte coletivo
<p>Saídas selecionadas da modelagem (por link):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nó inicial / nó final • Extensão (m) • Fluxo de veículos (veículos/h) • Velocidade (km/h) 	<p>Saídas selecionadas da modelagem (por link e por linha):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nó inicial / nó final • Extensão (m) • Identificação da linha • Modo <ul style="list-style-type: none"> • Ônibus municipal • Ônibus intermunicipal • Metrô • Tipo de veículo <ul style="list-style-type: none"> • Microônibus • Convencional • Alongado • Articulado • Fluxo de passageiros (pax/h) • Tempo de viagem (min) • Frequência (veículo/h)

3.3. Formulação do algoritmo de cálculo de emissões

A partir destes dados da modelagem de transporte, foram elaborados algoritmos para o cálculo das emissões dos automóveis e dos ônibus. Num primeiro formulário, para os automóveis, aplica-se para cada *link*:

$$\begin{aligned}
 \underbrace{Vkm(l, r, a, c)}_{\frac{\text{veículo.km}}{h}} &= \underbrace{F(l, r, a)}_{\frac{\text{veículo}}{h}} \times \underbrace{e(l)}_{km} \times R(c, a) \\
 \underbrace{Pkm(l, r, a, c)}_{\frac{\text{pax.km}}{h}} &= \underbrace{Vkm(l, r, a)}_{\frac{\text{veículo.km}}{h}} \times \underbrace{O}_{\frac{\text{pax}}{\text{veículo}}} \\
 \underbrace{C(l, r, a, c)}_{\frac{L}{h}} &= \underbrace{Vkm(l, r, a, c)}_{\frac{\text{veículo.km}}{h}} \times \underbrace{Ce(c, a, v(l, r, a))}_{\frac{L}{\text{veículo.km}}} \\
 \underbrace{E(p, l, r, a, c)}_{\frac{g}{h}} &= \underbrace{Vkm(l, r, a, c)}_{\frac{\text{veículo.km}}{h}} \times \underbrace{Fe(p, a, c)}_{\frac{g}{\text{veículo.km}}}
 \end{aligned}$$

Onde:

- Vkm , veículo-km, é a distância total percorrida pelos veículos operando com o combustível (c) no *link* (l), na hora-pico-manhã. Este valor depende da rede de transporte (r) considerada e do ano (a);
- F é o fluxo de automóveis no *link* (l), na hora-pico-manhã. Este valor depende da rede de transporte (r) considerada e do ano (a);
- e é a extensão do *link* (l);
- R é a fração do Vkm por tipo de combustível (c) no ano (a);
- Pkm é a produção de transporte, expressa em passageiros-quilômetro, ocorrida no *link* (l) na hora-pico-manhã. Este valor depende da rede de transporte (r) considerada e do ano (a);
- O é a taxa de ocupação assumida para o automóvel;
- C é o consumo do combustível estimado (c), no *link* (l), no ano (a) e para a rede de transporte (r);
- Ce é o parâmetro de consumo de combustível por quilômetro em função da velocidade (v) no *link* (l). Ele também depende do combustível utilizado (c) e do ano (a). A velocidade no *link* depende da rede de transporte (r) considerada e do ano (a);
- E é a emissão do poluente ou gás (p), no *link* (l), no ano (a), para a rede de transporte (r) pelo combustível (c);
- Fe é o fator de emissão do do poluente ou gás (p), no ano (a), pelo combustível (c).

Os tipos de combustíveis a serem considerados são a gasolina C e o etanol hidratado¹². A dependência dos parâmetros de consumo de combustível por quilômetro (Ce) e dos fatores de emissão (Fe) em relação ao ano (a) se dá em função do perfil de idade da frota, uma vez que veículos de diferentes anos de fabricação têm diferentes fatores de emissão.

Num segundo formulário, para o transporte coletivo, aplica-se para cada linha de transporte coletivo em cada *link*:

$$\begin{aligned} \underbrace{Vkm(L, t, l, r, a)}_{\frac{\text{veículo.km}}{h}} &= \underbrace{f(L, t, l, r, a)}_{\frac{\text{veículo}}{h}} \times \underbrace{e(l)}_{km} \\ \underbrace{Pkm(L, l, r, a)}_{\frac{\text{pax.km}}{h}} &= \underbrace{P(L, l, r, a)}_{\frac{\text{pax}}{h}} \times \underbrace{e(l)}_{km} \\ \underbrace{v(L, l, r, a)}_{\frac{km}{h}} &= \frac{\underbrace{e(l)}_{km}}{\underbrace{T(L, l, r, a)}_{min}} \times \underbrace{60}_{\frac{min}{h}} \\ \underbrace{C(L, t, l, r, a)}_{\frac{L}{h}} &= \underbrace{Vkm(L, t, l, r, a)}_{\frac{\text{veículo.km}}{h}} \times \underbrace{Ce(t, a, v(L, l, r, a))}_{\frac{L}{\text{veículo.km}}} \\ \underbrace{E(p, L, t, l, r, a)}_{\frac{g}{h}} &= \underbrace{C(L, t, l, r, a)}_{\frac{L}{h}} \times \underbrace{Fe(p, a)}_{\frac{g}{L}} \end{aligned}$$

¹² Pode existir também o consumo de gás natural GNV, mas que por sua pequena importância relativa em comparação com a gasolina C e o etanol hidratado, não foi considerado neste estudo.

Onde:

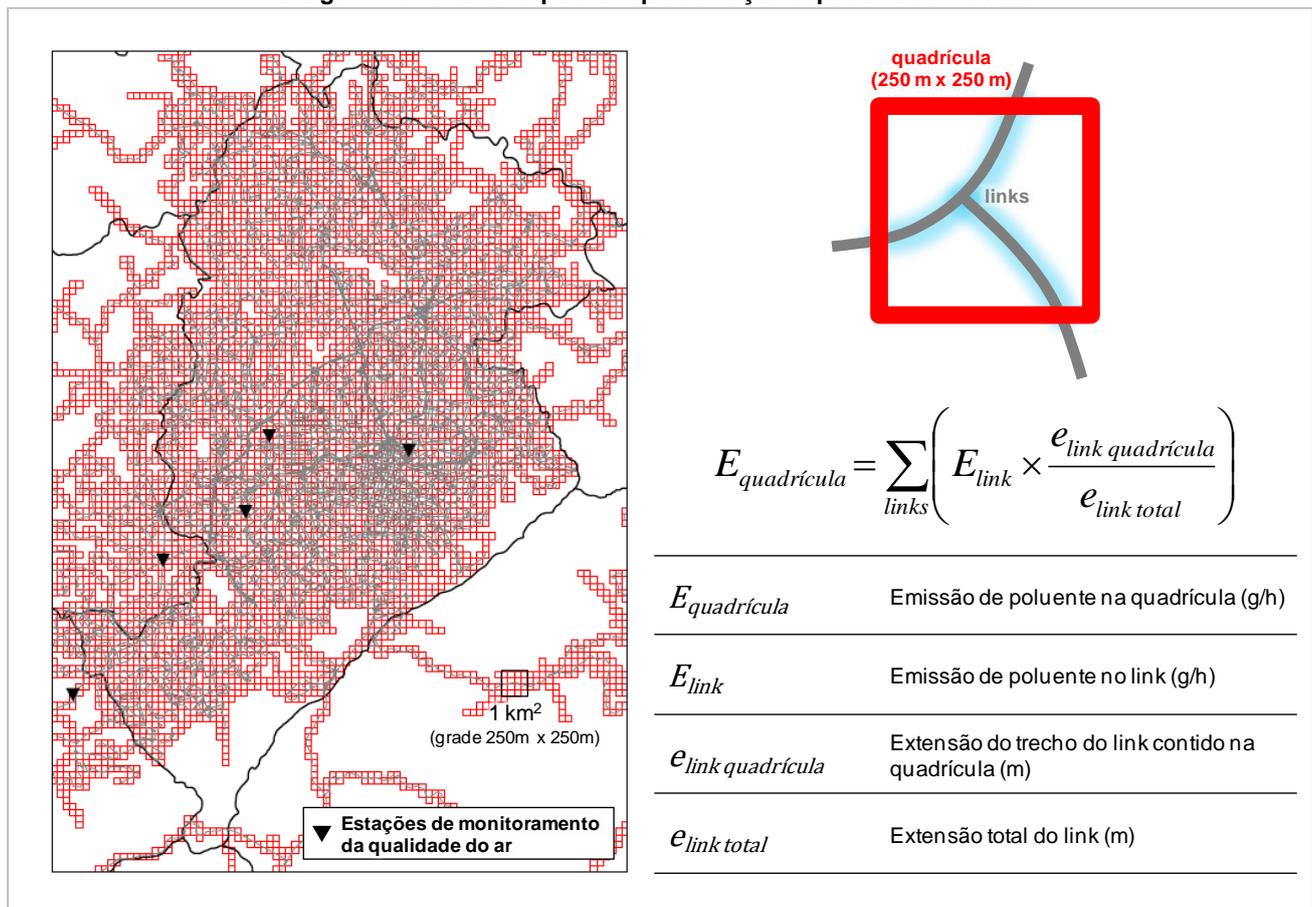
- Vkm , veículo-km, é a distância total percorrida pelos veículos da linha (L) operando com o tipo de veículo (t) no *link* (l), na hora-pico-manhã. Este valor depende da rede de transporte (r) considerada e do ano (a);
- f é a frequência de passagem dos veículos da linha (L) operando com o tipo de veículo (t) no *link* (l), na hora-pico-manhã. Este valor depende da rede de transporte (r) considerada e do ano (a);
- e é a extensão do *link* (l);
- Pkm é a produção de transporte, expressa em passageiros-quilômetro, da linha (L) ocorrida no *link* (l) na hora-pico-manhã. Este valor depende da rede de transporte (r) considerada e do ano (a);
- P é o fluxo de passageiros da linha (L) ocorrida no *link* (l) na hora-pico-manhã. Este valor depende da rede de transporte (r) considerada e do ano (a);
- v é a velocidade dos veículos da linha (L), no *link* (l) na hora-pico-manhã. Este valor depende da rede de transporte (r) considerada e do ano (a);
- T é o tempo que um veículo da linha (L) leva para percorrer o *link* (l). Este valor depende da rede de transporte (r) considerada e do ano (a);
- C é o consumo de combustível, da linha (L) operando com o tipo de veículo (t) no *link* (l), no ano (a) e para a rede de transporte (r);
- Ce é o parâmetro de consumo de combustível por quilômetro em função da velocidade (v) no *link* (l). Ele também depende do tipo de veículo (t) e do ano (a). A velocidade no *link* depende da linha (L), da rede de transporte (r) considerada e do ano (a);
- E é a emissão do poluente ou gás (p), da linha (L) operando com o tipo de veículo (t) no *link* (l), para a rede de transporte (r), no ano (a);
- Fe é o fator de emissão do poluente ou gás (p) no ano (a), expresso em gramas de poluente por litro de combustível.

No transporte coletivo, o metrô não apresenta emissões por ser movido a eletricidade e não possuir motores a combustão. De forma similar aos automóveis, nos ônibus a dependência dos parâmetros de consumo de combustível por quilômetro (Ce) e dos fatores de emissão (Fe) em relação ao ano (a) se dá em função do perfil de idade da frota, uma vez que veículos de diferentes anos de fabricação têm diferentes fatores de emissão. Além disso, Ce e Fe variam também conforme o porte dos ônibus (t), classificados como microônibus, convencional, alongado e articulado. Apenas um tipo de combustível foi considerado para os ônibus, o óleo Diesel, com mistura de 5% de biodiesel.

3.4. Espacialização das emissões

O cálculo e a representação territorial das emissões em mapas foram realizados a partir da definição de uma quadrícula de 1 km², conforme mostra a Figura 4. A mesma Figura 4 também inclui a equação utilizada para alocar, em cada quadrícula, as emissões calculadas por *link* (conforme seção 3.3). Assumiu-se a distribuição das emissões de cada link proporcionalmente à fração da sua extensão que se localiza dentro de uma dada quadrícula.

Figura 4: Definição de quadrícula sobre o mapa de Belo Horizonte e algoritmo de cálculo para a representação espacial de emissões



3.5. Fontes de informação para fatores de emissão e parâmetros de consumo de combustível

De posse dos dados de atividade oriundos da modelagem de transporte, o cálculo de emissões e consumo de combustível consiste na aplicação dos fatores de emissão e parâmetros de consumo de combustível mais adequados para cada situação, a depender principalmente do tipo de veículo e seu perfil tecnológico, do combustível utilizado e da velocidade de operação.

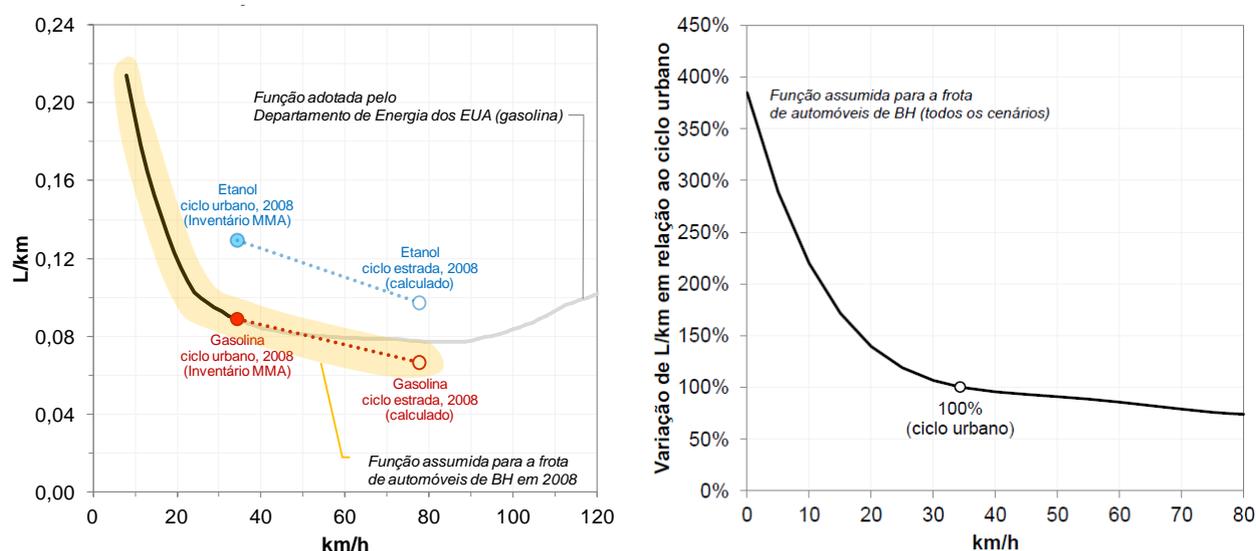
3.5.1. Parâmetros de consumo de combustível por quilômetro em função da velocidade

Para os automóveis, utilizou-se uma curva paramétrica de consumo de combustível por quilômetro em função da velocidade construída a partir da combinação de cinco informações, quais sejam:

- (1) O consumo de combustível por quilômetro médio para veículos operando com gasolina C no ano 2008, a nível nacional, em ciclo urbano¹³, calculado a partir de MMA (2014);
- (2) O consumo de combustível por quilômetro médio para veículos operando com gasolina C no ano 2008, a nível nacional, em ciclo de estrada, estimado pelo IEMA;
- (3) O consumo de combustível por quilômetro médio para veículos operando com etanol hidratado no ano 2008, a nível nacional, em ciclo urbano, calculado a partir de MMA (2014);
- (4) O consumo de combustível por quilômetro médio para veículos operando com etanol hidratado no ano 2008, a nível nacional, em ciclo estrada, estimado pelo IEMA;
- (5) Curva de consumo de gasolina por quilômetro para veículos leves, adotada pelo Departamento de Energia dos EUA.

O Gráfico 4 mostra como estas informações foram utilizadas para se chegar a uma curva que calcula o consumo de combustível por quilômetro para diferentes velocidades, tendo em mãos o dado de consumo de combustível por quilômetro médio da frota no ciclo urbano.

Gráfico 4: Consumo de combustível por quilômetro dos automóveis em função da velocidade (a) exemplo para veículos ano-modelo 2008 e (b) função geral



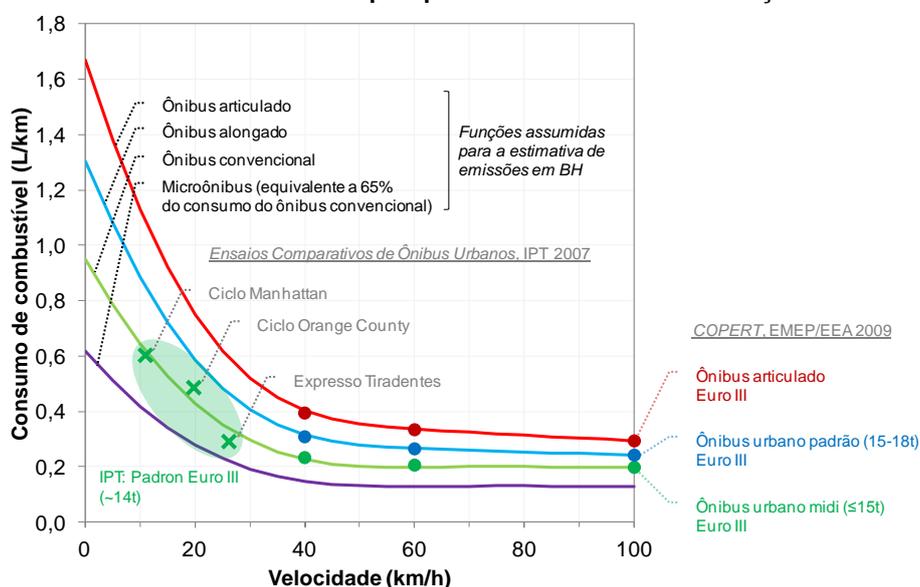
¹³ A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece procedimentos para a medição do consumo de combustível por veículos leves segundo dois ensaios padrão de condução: (i) o ciclo urbano, que simula as condições de operação nas cidades através de um perfil de variação de velocidades e acelerações com velocidade média de aproximadamente 34 km/h, e (ii) o ciclo estrada, que simula as condições de operação em vias de alta velocidade, através de um perfil de variação de velocidades e acelerações com velocidade média de aproximadamente 78 km/h.

Para os ônibus, inexistem no país procedimentos padronizados para a medição do consumo de combustível do veículo. A prática regulamentada é a medição do consumo de combustível apenas dos motores, em dinamômetros de bancada¹⁴. Deste modo, foram definidas curvas de consumo de combustível por quilômetro em função da velocidade para cada um dos quatro tipos de ônibus (microônibus, convencional, alongado e articulado) a partir de dois conjuntos de informação:

- (1) Medições de consumo de combustível realizadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (SP) de um ônibus em diferentes condições operacionais, utilizando um equipamento de medição embarcado no veículo (IPT, 2007);
- (2) Dados de consumo de combustível por quilômetro adotadas pela Agência Ambiental Europeia (EEA, 2013).

Assumiu-se também que os microônibus têm um consumo de combustível equivalente a 65% do consumo dos ônibus convencionais. O Gráfico 5 mostra como estas informações foram utilizadas para se chegar às curvas de consumo de combustível por quilômetro adotadas no presente estudo.

Gráfico 5: Consumo de combustível por quilômetro dos ônibus em função da velocidade



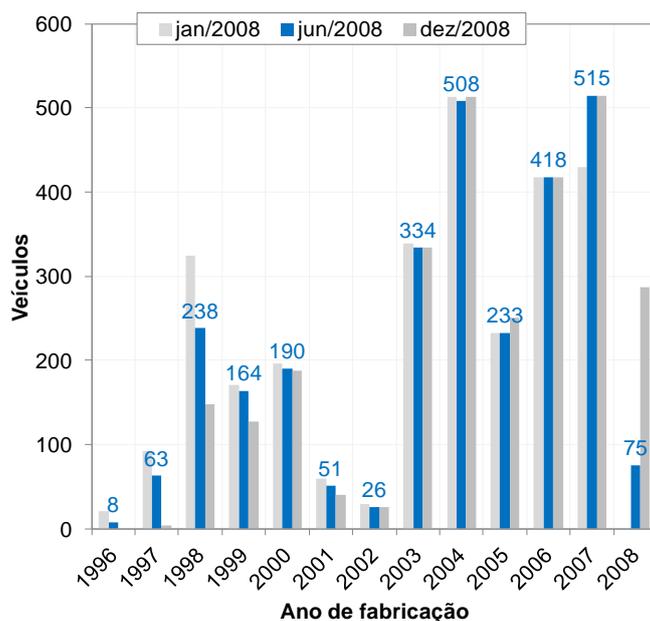
3.5.2. Fatores de emissão

Os fatores de emissão adotados neste estudo são aqueles do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2014, Ano Base 2012 (MMA, 2014), buscando adequá-los aos perfis de idades da frota de Belo Horizonte.

Para os ônibus, o perfil de idades da frota em 2008 foi adotado como aquele referente ao mês de junho, conforme relatado pela BHTrans (Gráfico 6). Para os anos 2014 e 2020, assumiu-se que o perfil de idades seria mantido constante, ou seja, sem alteração na idade média da frota.

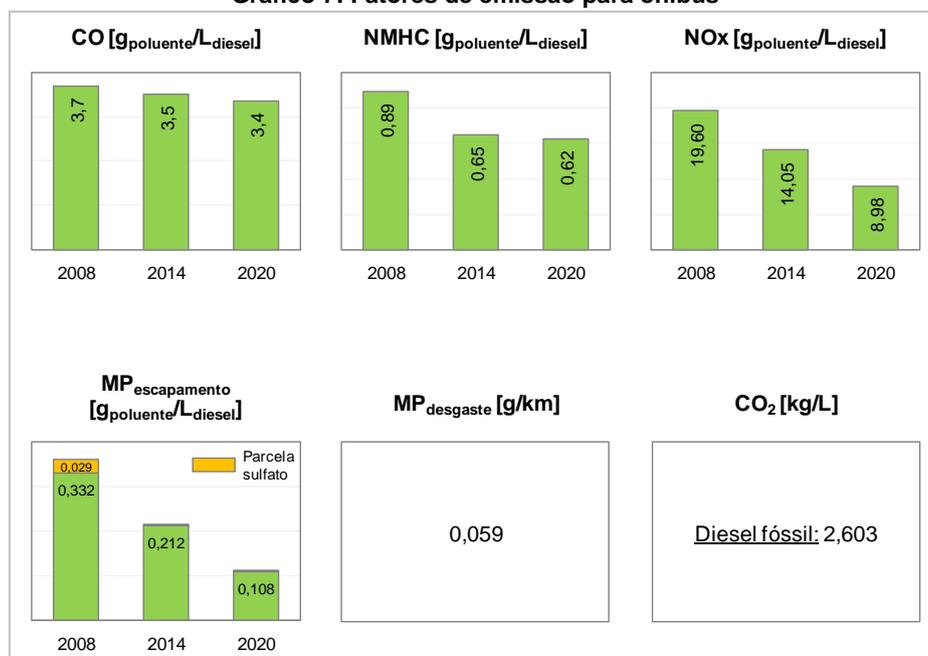
¹⁴ Dinamômetro de bancada é um aparelho utilizado em laboratórios capaz de medir o torque e a rotação instantânea de motores a ele acoplados. No caso de motores do ciclo Diesel, no Brasil, a norma ABNT NBR 14489 determina que sejam testados em 13 pontos com diferentes pares de rotação e torque, gerando valores médios ponderados de emissão de gases por unidade de energia (g/kWh).

Gráfico 6: Frota de ônibus de BH em 2008, por ano de fabricação
 (Fonte: BHTrans Relatório Gerencial Resultados Operacionais Dezembro/2008)



Uma vez determinados os perfis de idade dos ônibus para os anos 2008, 2014 e 2020, foram calculados os fatores de emissão médios para estes anos, com os dados de MMA (2014). O Gráfico 7 apresenta tais fatores para os poluentes monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não-metano (NMHC), óxidos de nitrogênio (NOx), material particulado oriundo da combustão (MP_{escapamento}), material particulado oriundo do desgaste de pneus, freio e pista (MP_{desgaste}) e para o gás de efeito estufa dióxido de carbono (CO₂).

Gráfico 7: Fatores de emissão para ônibus



Para os automóveis, a partir dos dados do Departamento de Trânsito de Minas Gerais (DETRAN-MG) e do Inventário do MMA (2014) – Gráfico 8, foram identificadas apenas pequenas diferenças entre os perfis de idade da frota brasileiro e belo-horizontino, quando ponderados pela quilometragem rodada (Gráfico 9).

Gráfico 8: Perfil de idade da frota e perfil de uso por idade do Inventário Nacional (Fonte: MMA, 2014)

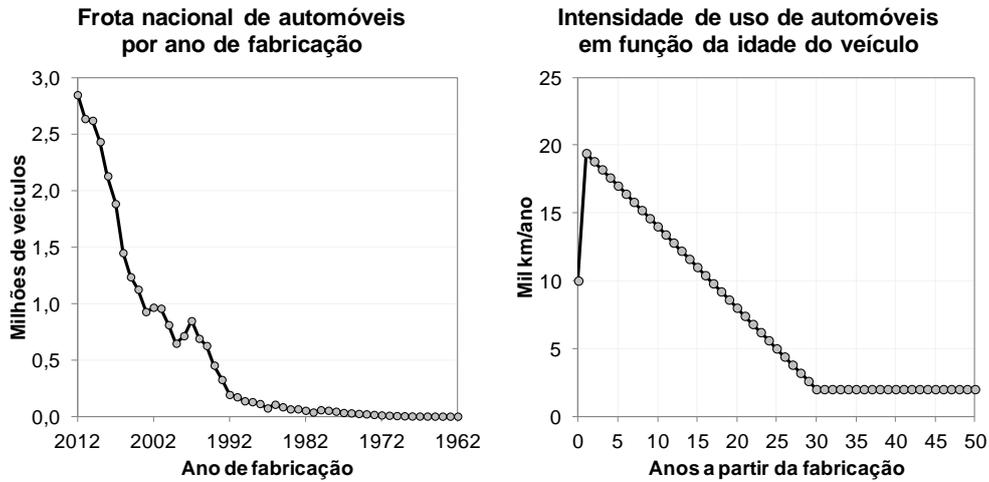
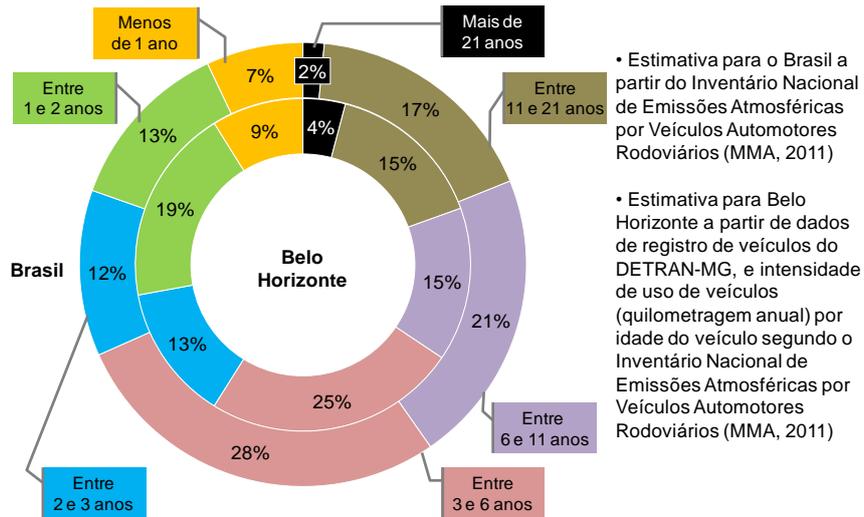


Gráfico 9: Estimativas de perfis de idade da frota de automóveis em 2012, no Brasil e em Belo Horizonte, com ponderação pela quilometragem rodada

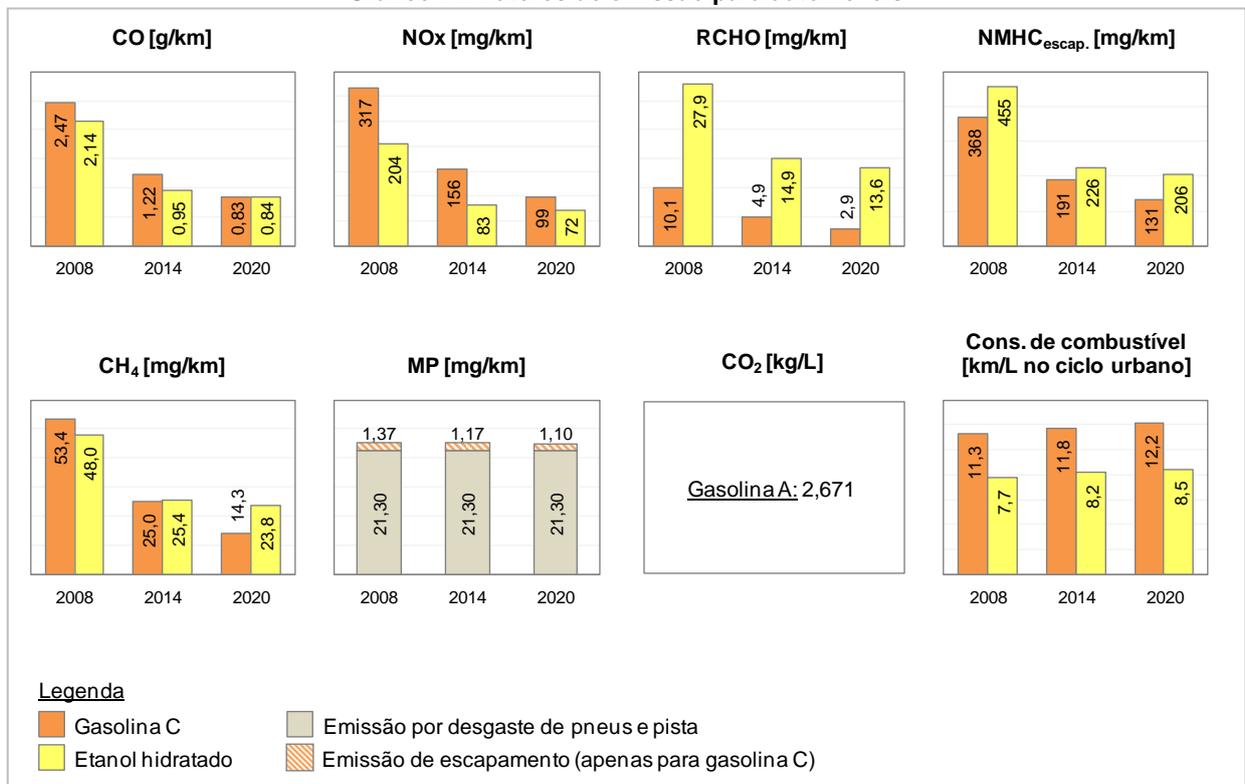


A metodologia do MMA (2014) para a projeção da frota no futuro exige que se disponha dos dados históricos de vendas de veículos (como ilustra o Gráfico 10). Assim, na indisponibilidade dos dados de vendas de veículos em Belo Horizonte, optou-se por utilizar os perfis de idade da frota nacional estimados para 2008, 2014 e 2020. Finalmente, foram calculados os fatores de emissão médios para cada ano, apresentados no Gráfico 11, que consideram a evolução tecnológica prevista para o período.

Gráfico 10: Estimativa de evolução da frota nacional de automóveis
(Fonte: elaborado a partir de MMA, 2014)



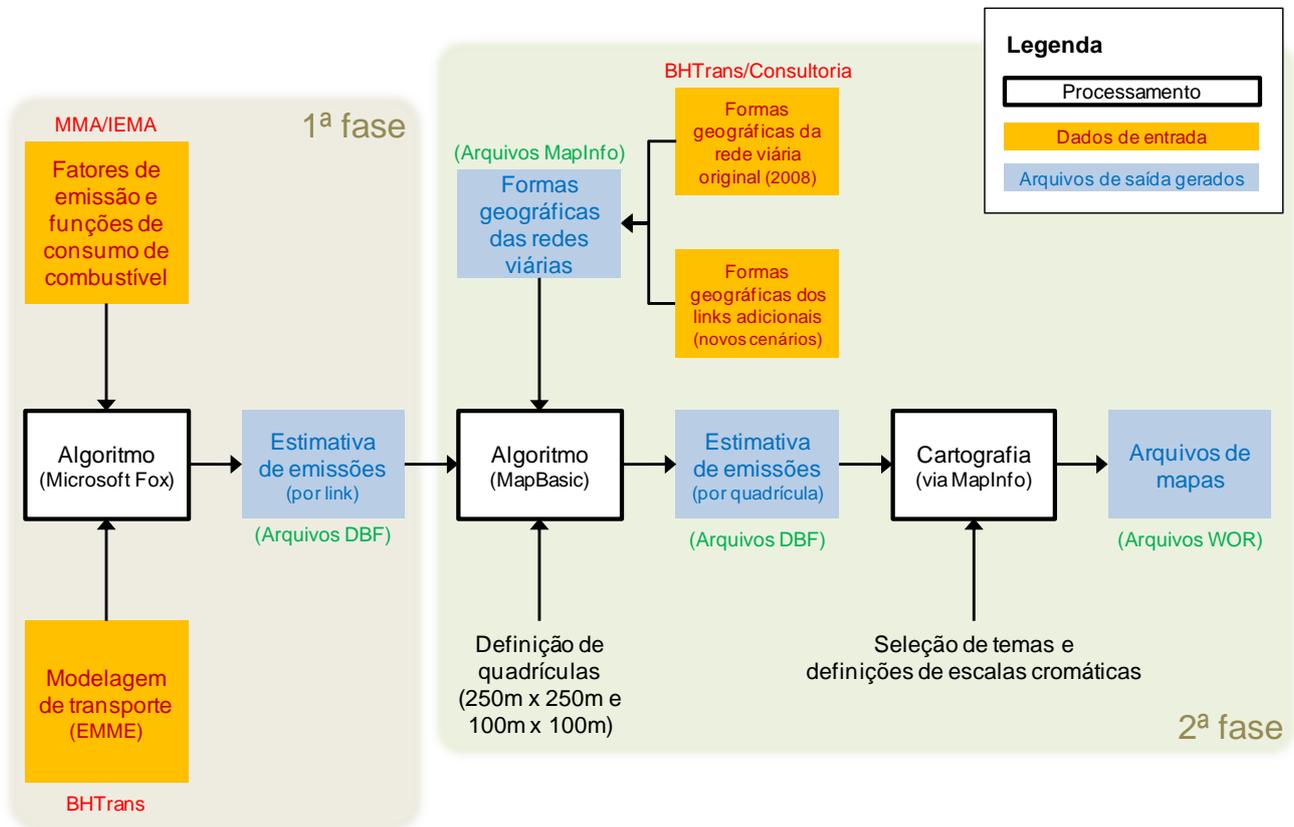
Gráfico 11: Fatores de emissão para automóveis



Deve-se notar que as estimativas assumiram que a escolha por gasolina C ou etanol hidratado por parte dos proprietários de veículos bicombustíveis (flex) foi 50% gasolina C e 50% etanol hidratado, mantida constante para os anos 2008, 2014 e 2020, à semelhança da hipótese assumida no Plano Setorial de Transporte e de Mobilidade Urbana para a Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima (Ministério das Cidades & Ministério dos Transportes, 2013).

A Figura 5 ilustra de maneira sintética os dados de entrada, os procedimentos, as ferramentas utilizadas e as etapas de trabalho que compuseram este trabalho.

Figura 5: Dados de entrada, procedimentos, ferramentas e etapas de trabalho



4. Resultados

Em relação às emissões atmosféricas, apresentam-se os resultados para os três principais poluentes atmosféricos que degradam a qualidade do ar atualmente nas grandes cidades brasileiras, quais sejam o material particulado (MP_{10}), os óxidos de nitrogênio (NO_x) e os hidrocarbonetos não-metano (NMHC), bem como o dióxido de carbono (CO_2), que é um gás de efeito estufa de maior relevância, em se tratando da formação de gases a partir da queima de combustíveis e na mobilidade urbana.

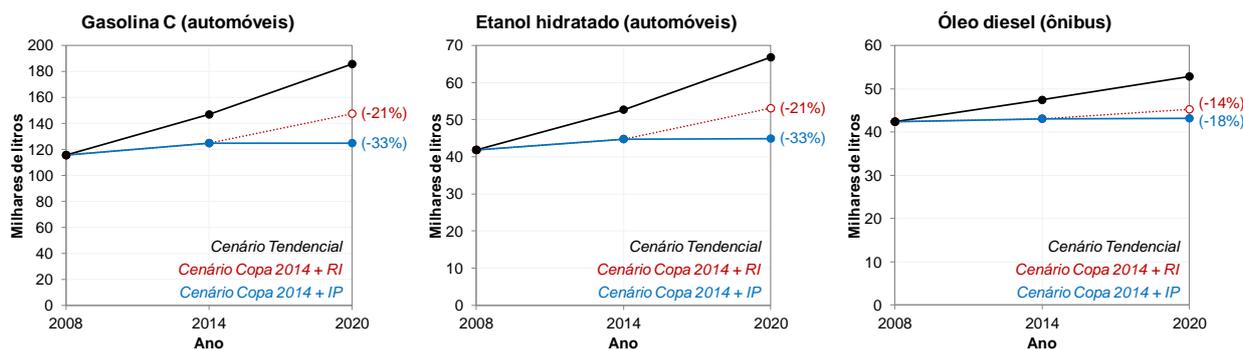
O material particulado é um poluente cujas concentrações têm ultrapassado sistematicamente os padrões de qualidade do ar (IEMA, 2014). Outro poluente crítico é o ozônio (O_3), que no nível troposférico é formado a partir de reações fotoquímicas das quais participam principalmente os óxidos de nitrogênio e os hidrocarbonetos não-metano. Deve-se ter em ressalva que os resultados da presente estimativa de emissões de MP_{10} , NO_x e NMHC não devem ser interpretados como correlação direta com os efeitos nas concentrações atmosféricas dos poluentes, dadas as limitações de escopo apresentadas na seção 3.1 bem como as incertezas contidas nos fatores de emissão publicados pelo Ministério do Meio Ambiente em seu Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (MMA, 2014).

Além dos resultados quantitativos apresentados por meios de gráficos, este estudo procurou alocar as emissões dos poluentes atmosféricos no mapa da cidade de Belo Horizonte, como o objetivo de possibilitar a identificação dos resultados e os efeitos do PlanMob-BH nas emissões dos principais corredores de transporte da cidade

4.1. Consumo de combustíveis

O Gráfico 12 mostra o resultado das estimativas para os consumos de gasolina C, etanol hidratado e óleo Diesel. Observa-se, no Cenário Tendencial, o crescimento do consumo de todos os combustíveis, com destaque para a gasolina C e o etanol hidratado, que movimentam o transporte individual, com aumentos de mais de 50% no horizonte de 12 anos (2008-2020).

Gráfico 12: Consumo estimado de combustível na hora-pico-manhã, para os diferentes cenários



No Cenário Atual (2008) o consumo da frota de automóveis é de cerca de 116 mil litros de gasolina C e 42 mil litros de etanol hidratado na hora-pico. No Cenário Tendencial, o consumo de gasolina C é estimado em cerca de 186 mil litros e do etanol hidratado é estimado em 67 mil litros em 2020. O consumo de óleo Diesel, por sua vez, é de 42 mil litros no ano de 2008 e 53 mil litros em 2020, no Cenário Tendencial.

No Cenário 2020 com Restrição de Investimentos (2020 RI), o consumo de combustível por automóveis é reduzido em 21% em relação ao Cenário Tendencial, atingindo cerca de 148 mil litros de gasolina C e 53 mil litros de etanol hidratado. Já no Cenário 2020 Investimento Pleno (Transformador), a redução é de 33%, com um consumo estimado de 125 mil litros de gasolina C e 45 mil litros de etanol hidratado.

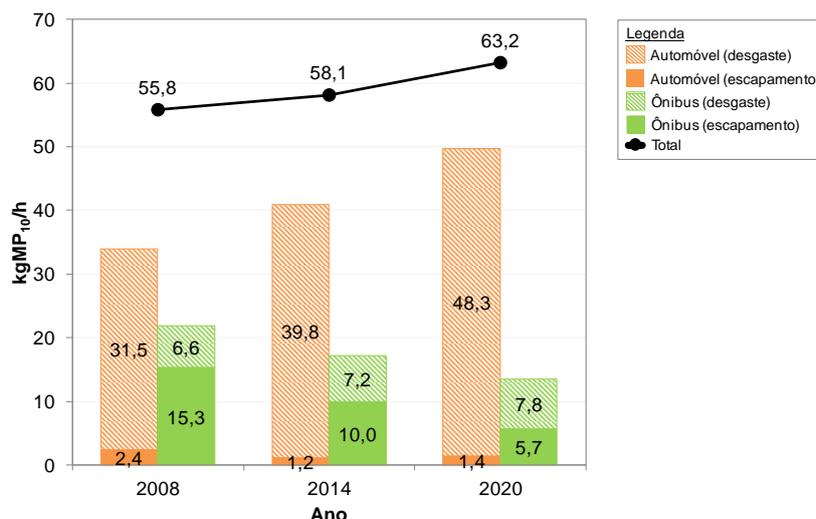
Também há redução de consumo no caso dos ônibus, mas de forma menos acentuada. No Cenário 2020 com Restrição de Investimento, a redução chega a 14%, com o consumo de 45 mil litros e no Cenário 2020 com Investimento Pleno (Transformador) a redução é de 18%, com o consumo estimado em 43 mil litros. Observa-se também reduções no consumo de combustível tanto pela frota de automóveis quanto pela frota de ônibus no Cenário Copa 2014, respectivamente 21% no consumo de gasolina C e etanol hidratado e 14% no consumo de óleo Diesel.

4.2. Emissões de material particulado (MP₁₀)

De acordo com o Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2014, Ano Base 2012 (MMA, 2014), as emissões veiculares de material particulado são provocadas tanto a partir da combustão (emissões de escapamento) quanto a partir do desgaste pneus, freios e pista (emissões de desgaste).

A combustão do óleo Diesel tipicamente gera material particulado em quantidades muito maiores do que a combustão da gasolina C. Considera-se que as emissões de material particulado pela queima do etanol hidratado são desprezíveis (MMA 2014). As emissões de material particulado resultantes da implantação do PlanMob-BH são apresentadas no Gráfico 13.

Gráfico 133: Emissões estimadas de MP₁₀ na hora-pico-manhã, no Cenário Tendencial



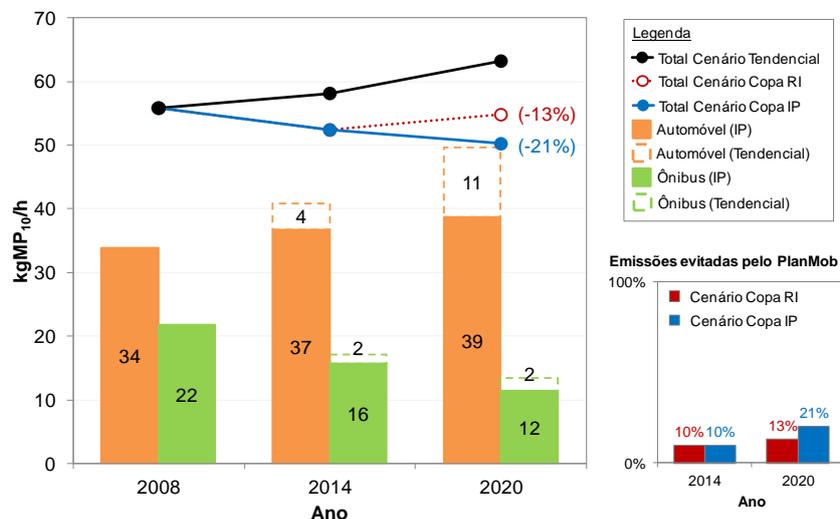
Na emissão de material particulado na hora pico do sistema de mobilidade urbana de Belo Horizonte em 2008, quando são observadas apenas as emissões resultantes da queima de combustível, a frota de ônibus era responsável por 15,3 kgMP₁₀/h, o que corresponde a 86,4% das emissões, enquanto a frota de automóvel respondia por 2,4 kgMP₁₀/h equivalente a 13,6% das emissões, que totalizam 17,7 KgMP₁₀/h. Quando são consideradas as emissões de MP provenientes do desgaste de pneus, freios e pista, o total das emissões é de 55,8 kgMP₁₀/h, o que representa um acréscimo de 38,1 kgMP₁₀/h nas emissões relativas ao combustível. Há também uma inversão na participação relativa da frota de ônibus e veículos leves. A frota de ônibus é responsável por 21,9 kgMP₁₀/h, que corresponde a 39% das emissões totais e a frota de automóveis, por sua vez, emite 33,9 KgMP₁₀/h, o que corresponde a 61% das emissões totais.

No Cenário Tendencial, percebe-se que as emissões de MP decorrentes da queima de óleo Diesel pela frota de ônibus tendem a diminuir com o passar dos anos, o que pode ser atribuído à evolução tecnológica da frota, por meio da substituição de veículos mais antigos e mais poluentes por veículos mais novos e menos poluentes (fases do PROCONVE). Essas emissões atingiriam 10 kgMP₁₀/h em 2014 e 5,7 kgMP₁₀/h em 2020, o que representa uma redução de 67% em relação ao ano base de 2008. As emissões decorrentes da circulação da frota de veículos leves atingiriam 1,2 kgMP₁₀/h em 2014, o que representa uma redução de 50% comparada à 2008, e teria um leve aumento em 2020 em relação ao Cenário Copa 2014, quando atingiria 1,4 kgMP₁₀/h.

Quando são consideradas também as emissões de MP decorrentes do desgaste de pneus, freios e pista, a frota de veículos leves seria responsável por 49,7 kgMP₁₀/h e a frota de ônibus seria responsável por 13,5 kgMP₁₀/h. Percebe-se o aumento das emissões totais do sistema de mobilidade urbana, que atingiria 63,2 kgMP₁₀/h em 2020 e a participação relativa maior da frota de veículos leves, que atingiria 79% contra 21% da frota de ônibus. O Cenário Tendencial mostra que essas emissões crescem à medida que cresce o uso do automóvel.

O Gráfico 14 complementa o Gráfico 13 apresentando as emissões estimadas no Cenário Copa 2014 + RI e no Cenário 2020 Transformador.

Gráfico 14: Emissões estimadas de MP₁₀ na hora-pico-manhã, nos diferentes cenários

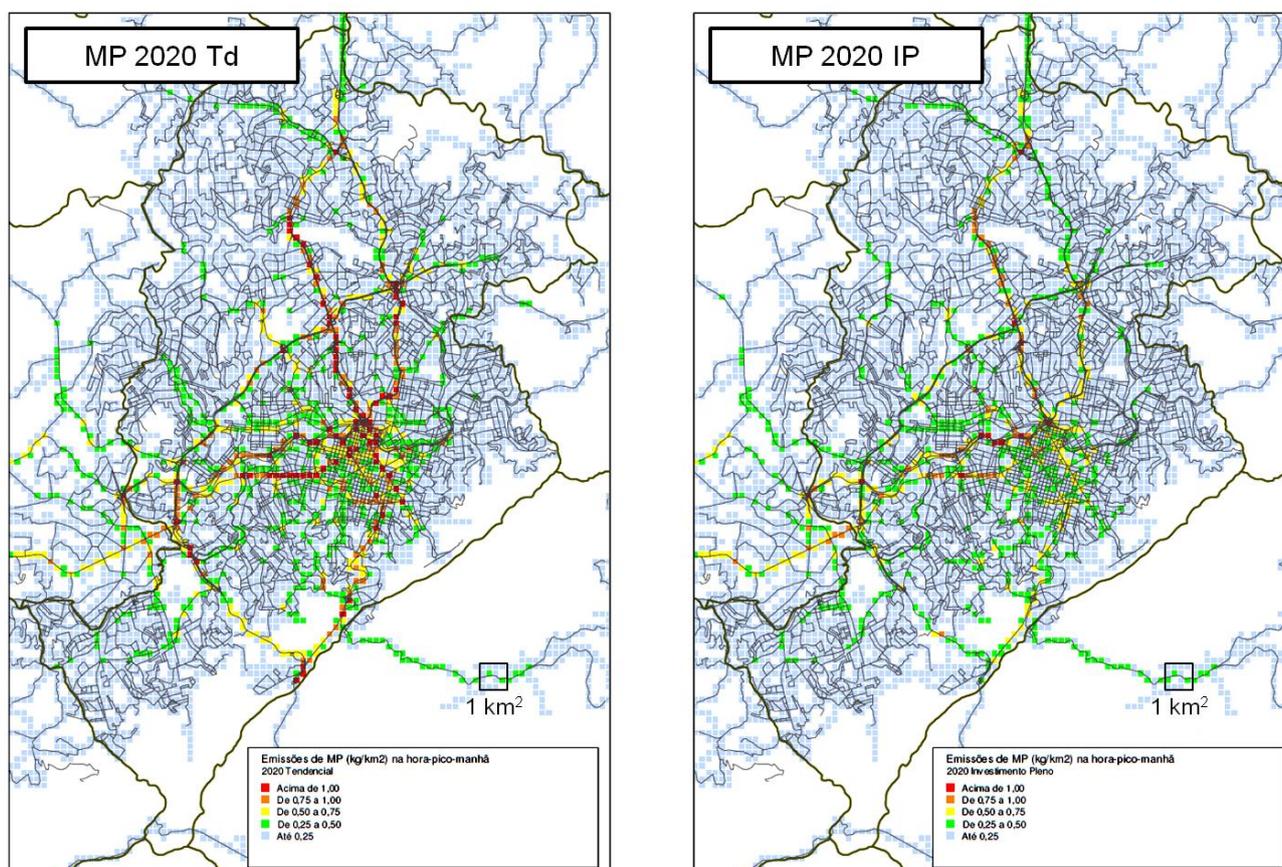


No Cenário Copa 2014 haveria uma redução de 4 kgMP₁₀/h na participação da frota de veículos leves e 2 kgMP₁₀/h na participação da frota de ônibus, enquanto o total cairia de 58 KgMP₁₀/h para 53 kgMP₁₀/h, cerca de 10%, quando comparadas com o Cenário Tendencial. No Cenário 2020 Transformador, as emissões decorrentes da queima de combustível e desgaste, seriam de 39 kgMP₁₀/h para a frota de veículos leves e 12 kgMP₁₀/h para a frota de ônibus urbano, totalizando 51 kgMP₁₀/h, o que representa uma redução total de aproximadamente 21% em relação ao Cenário Tendencial, previsto para 63 kgMP₁₀/h na hora pico da manhã. Observa-se que esta redução é resultado, principalmente, da redução das viagens por automóvel.

No entanto, deve-se chamar atenção ao fato de que, diferentemente das emissões de material particulado por combustão, não há regulação para as emissões de desgaste e são desconhecidos os estudos nacionais que investigam estas emissões. O próprio Inventário Nacional (MMA, 2014) aponta para a necessidade de explorar melhor o tema.

O Mapa 1 apresenta o resultado da espacialização das emissões estimadas de material particulado, para o ano 2020 no Cenário Tendencial e no Cenário Transformador.

Mapa 1: Emissões estimadas de MP₁₀ na hora-pico-manhã, em 2020, nos cenários Tendencial e Transformador

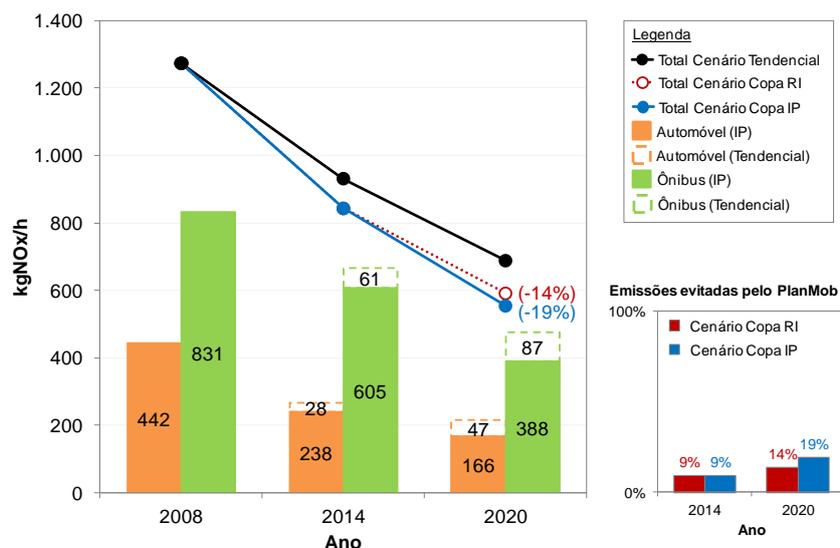


As emissões de MP₁₀ são representadas nestes mapas em uma escala de cores que vai de azul claro, representando até 0,25 kg/km², sendo esta a menor concentração, até a cor vermelha, que representa uma concentração superior a 1,0 kg/km², a maior da escala. O mapa da cidade foi dividido em quadrículas de 1 km², conforme apresentado no item 2.4. Como era de se esperar, as emissões se concentram sobre as vias de maior carregamento de veículos e também na área central. Comparando-se as cores predominantes nos mapas dos cenários Tendencial e Transformador, fica evidente a redução das emissões em diversos eixos de transporte da cidade em 2020, pelo contraste de cores observada.

4.3. Emissões de óxidos de nitrogênio (NOx)

As emissões de NO_x na hora-pico-manhã para os cenários do PlanMob-BH são apresentadas no Gráfico 15.

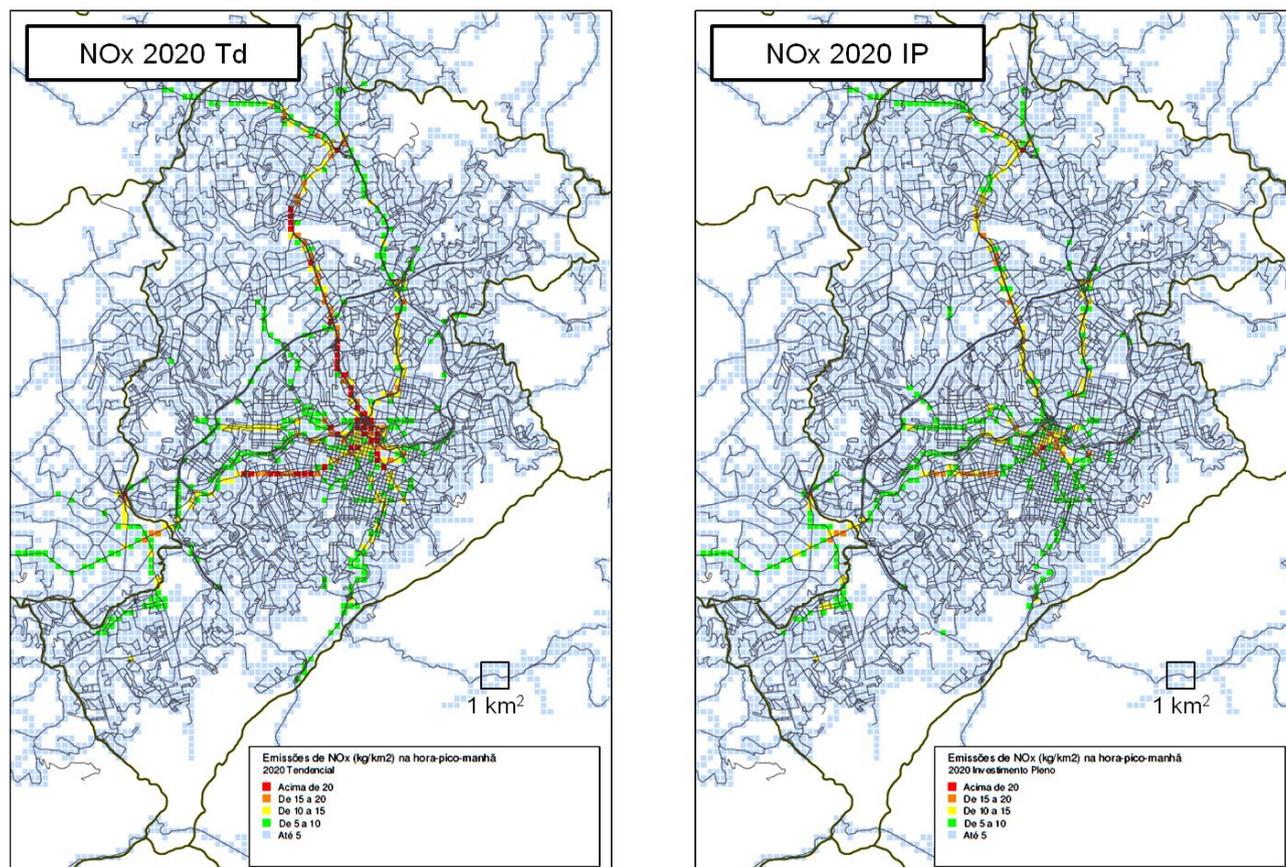
Gráfico 155: Emissões estimadas de NOx na hora-pico-manhã, nos diferentes cenários



As emissões de NOx em 2008 alcançavam quase 1,3 tonelada, sendo 442 kgNOx/h relativas à frota de automóveis e 831 kgNOx/h relativas à frota de ônibus, o que representa cerca de 65% do total. Com o efeito esperado da evolução tecnológica das frotas de automóveis e ônibus, conforme as fases do PROCONVE, e a substituição de veículos mais antigos e mais poluentes por veículos mais novos e menos poluentes, as emissões totais de NOx no Cenário Tendencial cairiam para um patamar próximo de 0,7 tonelada na hora-pico-manhã. A realização do Cenário 2020 Transformador resultaria na emissão de 388 kgNOx/h provenientes da frota de ônibus e 166 kgNOx/h provenientes da frota de automóveis, o que totalizaria cerca de 554 kgNOx/h, representando uma redução de 19% em relação ao Cenário Tendencial.

O Mapa 2 apresenta o resultado da espacialização das emissões estimadas de NOx, para o ano 2020 no Cenário Tendencial e no Cenário Transformador

Mapa 2: Emissões estimadas de NOx na hora-pico-manhã, em 2020, nos cenários Tendencial e Transformador

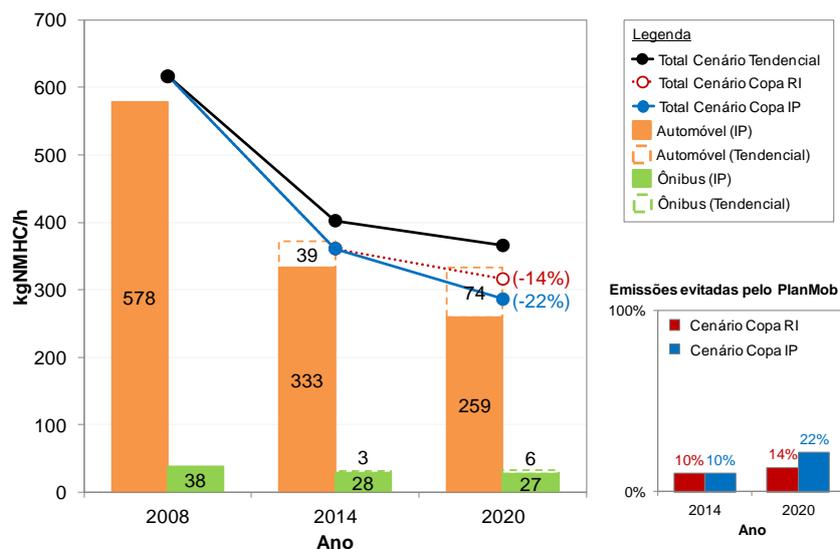


As emissões de NOx são apresentadas nestes mapas em uma escala de cores que vai do azul claro, representando até 5 kg/km², sendo esta a menor concentração, até a cor vermelha, que representa uma concentração acima de 20 kg/km², a maior da escala. Como era de se esperar, as emissões se concentram sobre as vias de maior carregamento de veículos, principalmente aquelas utilizadas pelo sistema de ônibus, e também na área central. Comparando-se as cores predominantes nos mapas dos cenários Tendencial e 2020 Transformador fica evidente a redução de emissões nos corredores de transporte.

4.4. Emissões de hidrocarbonetos não-metano (NMHC)

As emissões de NMHC na hora-pico-manhã em Belo Horizonte são apresentadas no Gráfico 16. Em 2008 elas alcançavam mais de 600 kg, sendo mais de 90% oriundas dos automóveis, já que a combustão do óleo Diesel tipicamente apresenta baixa emissão destes gases.

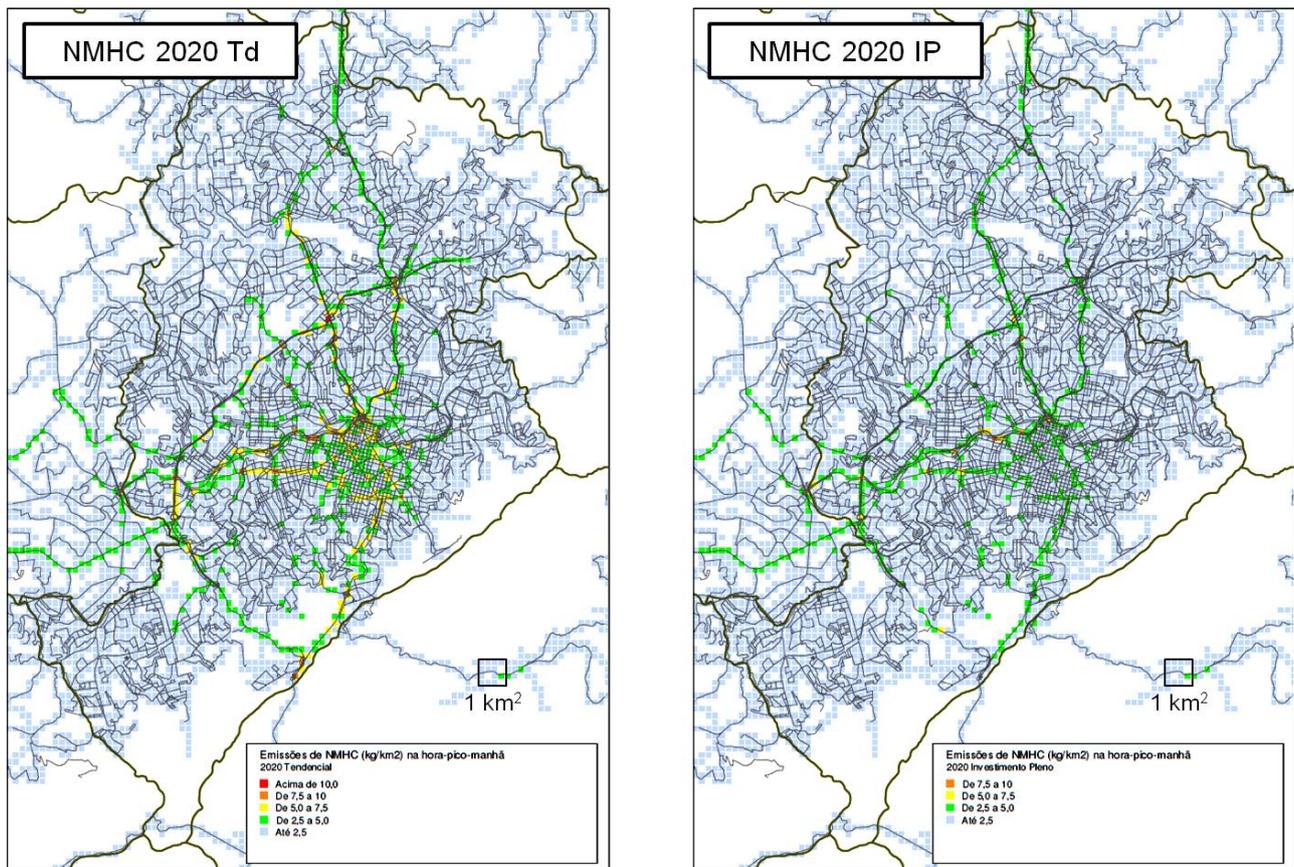
Gráfico 166: Emissões estimadas de NMHC na hora-pico-manhã, nos diferentes cenários



Com o efeito esperado da evolução tecnológica das frotas (substituição de veículos mais antigos e mais poluentes por veículos mais novos e menos poluentes), as emissões de NMHC no Cenário Tendencial cairiam para um patamar abaixo de 400 quilogramas na hora-pico-manhã. No Cenário Transformador, as emissões da frota de automóveis seriam atingiriam 259 kgNMHC/h, com redução de 74 kgNMHC/h em relação ao Cenário Tendencial e o total de emissões, considerando 27 kgNMHC/h provenientes da frota de ônibus, seria de aproximadamente 286 kgNMHC/h. Estas emissões representam uma redução de 22% em relação ao Cenário Tendencial.

O Mapa 3 apresenta o resultado da espacialização das emissões estimadas de NMHC, para o ano 2020 no Cenário Tendencial e no Cenário Transformador.

Mapa 3: Emissões estimadas de NMHC na hora-pico-manhã, em 2020, nos cenários Tendencial e Transformador



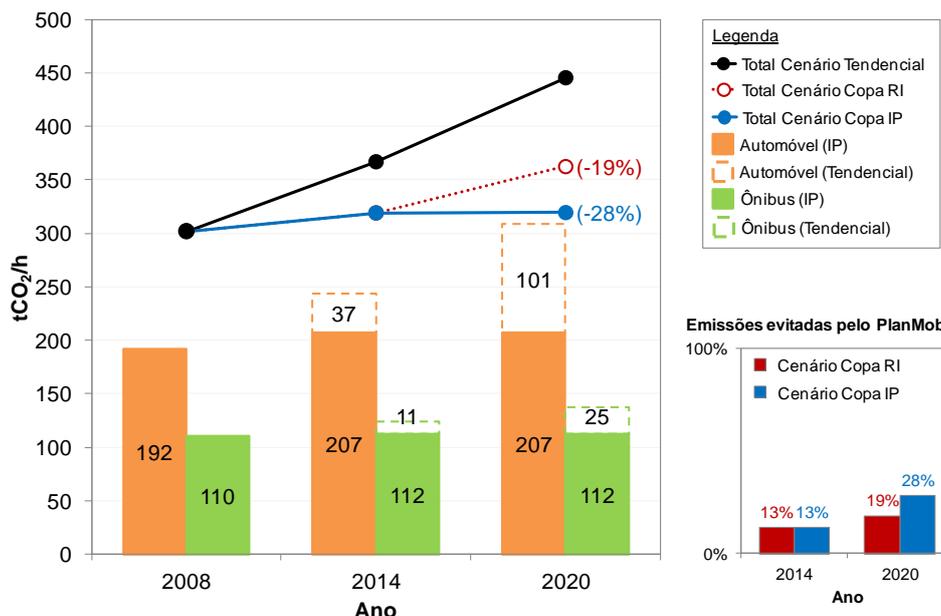
As emissões de NMHC são apresentadas nestes mapas em uma escala de cores que vai do azul claro, representando até 2,5 kg/km², sendo esta a menor concentração, até a cor vermelha, que representa uma concentração acima de 10 kg/km², a maior da escala. Comparando-se com os mapas anteriores, referentes ao MP₁₀ e aos NO_x, nota-se que as emissões de NMHC se apresentam de forma mais dispersa no espaço. Isto ocorre porque o NMHC é emitido em quase a sua totalidade pelos automóveis, que têm uma circulação mais bem distribuída no espaço viário do que o sistema de ônibus. Comparando-se os cenários, fica evidente a redução das emissões principalmente na área central da cidade.

4.5. Emissões de dióxido de carbono (CO₂)

A redução do consumo de combustíveis, principalmente dos combustíveis fósseis, está diretamente relacionada à redução de emissões de GEE, cujo principal gás é o dióxido de carbono (CO₂). Vale lembrar que neste estudo, o escopo de análise das emissões de CO₂ segue àquela do Inventário do MMA (2014), ou seja, apenas são quantificadas as emissões de escapamento¹⁵. Os resultados são apresentados no Gráfico 17.

¹⁵ Trata-se de uma abordagem “tanque-roda”, em que apenas as emissões da combustão no uso final do combustível estão sendo consideradas. Portanto, não estão sendo levadas em conta as emissões decorrentes da produção e distribuição dos combustíveis, como seria feito numa abordagem “poço-roda”.

Gráfico 177: Emissões estimadas de CO₂ fóssil na hora-pico-manhã, para os diferentes cenários

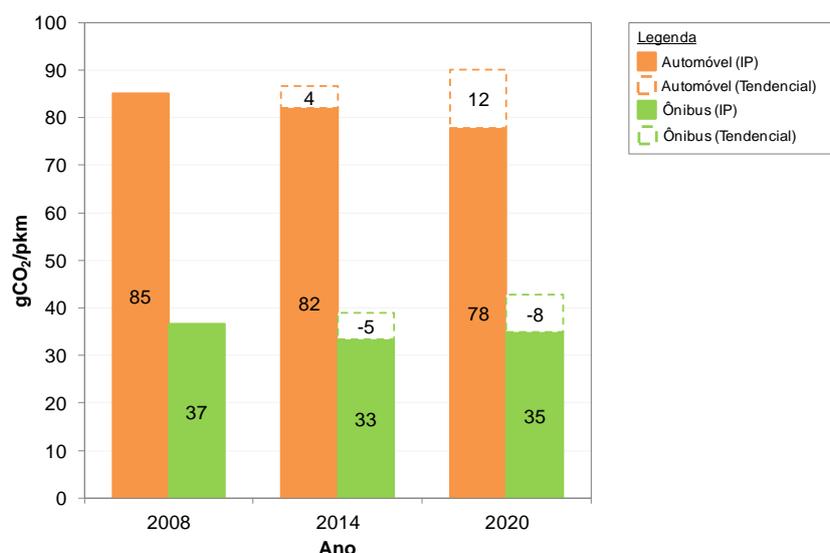


Como mostra o Gráfico 17, as emissões de CO₂ na hora-pico-manhã da frota de automóveis, que no Cenário Atual (2008) totalizavam 192 tCO₂/h, atingem 244 tCO₂/h em 2014 e 308 tCO₂/h em 2020 no cenário Tendencial, um aumento de cerca de 50% no período 2020 quando comparado com 2008. No caso da frota de ônibus, a estimativa é de 110 tCO₂/h em 2008, 123 tCO₂/h em 2014 e 137 tCO₂/h em 2020, no Cenário Tendencial, um aumento de 25% entre 2008 e 2020.

Entretanto, se as medidas previstas no Cenário 2020 com Restrição de Investimentos forem implementadas, haveria uma redução de 37 tCO₂/h emitidas pela frota de automóveis e 11 tCO₂/h emitidas pela frota de ônibus, que representa uma redução total de 19%. Já no Cenário 2020 IP (Transformador), haveria uma redução de 101 tCO₂/h nas emissões da frota de automóveis e 25 tCO₂/h na frota de ônibus. Em 2020, as emissões totais de CO₂, que seriam de 450 tCO₂/h no Cenário Tendencial para os dois tipos de veículos, são reduzidas para 319 tCO₂/h, representando uma redução de 28%.

Outro resultado interessante é poder comparar o comportamento da intensidade de emissão de CO₂ em relação ao deslocamento de pessoas promovido, ao longo dos anos, entre distintos cenários e para os diferentes modos de transporte, expresso por meio das emissões por passageiro-quilômetro, apresentado no Gráfico 18.

Gráfico 188: Emissões de CO₂ fóssil por passageiro-quilômetro, na hora-pico-manhã, para os Cenários Tendencial e Transformador



Em 2008 as emissões de CO₂ por pkm dos automóveis é de 85 gCO₂/pkm, mais de duas vezes superior às emissões de CO₂ por pkm dos ônibus, que totalizam 37 gCO₂/pkm. Tal diferença poderia ser muito superior, não fosse a utilização do etanol hidratado por uma parcela da frota de automóveis.

Nota-se que a intensidade de emissões crescem no Cenário Tendencial, tanto para os automóveis, que atingiria 86 gCO₂/pkm, quanto para os ônibus, que atingiriam 38 gCO₂/pkm. Este fato é explicado pela tendência de redução nas velocidades de circulação de todos os veículos, à medida em que cresce a demanda por viagens motorizadas com conseqüente pressão sobre sistema viário, já saturado em diversas localizações. Porém, com as intervenções previstas no Cenário Copa 2014, as emissões dos automóveis seriam de 82 gCO₂/pkm, uma redução de 4 gCO₂/pkm, e as emissões dos ônibus seriam de 33 gCO₂/pkm, uma redução de 5 gCO₂/pkm, ambas comparadas com o Cenário Tendencial.

No Cenário Transformador, para o qual se espera que o fluxo dos veículos tenha sua condição melhorada entre 2008 e 2020, a intensidade de emissões de CO₂ poderia vir a ter significativa redução quando comparado com o Cenário Tendencial, atingindo 78 gCO₂/pkm para os automóveis, uma redução de 12 gCO₂/pkm. Para os ônibus, a estimativa é de 35 gCO₂/pkm, com uma redução de 8 gCO₂/pkm.

5. Conclusões e recomendações

Os resultados deste estudo podem ser divididos em dois blocos temáticos. O primeiro refere-se ao desafio metodológico estabelecido para sua realização e o segundo bloco refere-se à sua aplicação no PlanMob-BH e os resultados que podem ser atribuídos ao conjunto de projetos e ações previstas no plano, considerando o consumo de energia e emissões de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa.

Os resultados do estudo, considerando os objetivos específicos relacionados ao desenvolvimento metodológico para sua realização, foram plenamente satisfatórios. O estabelecimento de uma metodologia para estimar os efeitos de medidas contidas num plano municipal de mobilidade urbana, em termos de emissões atmosféricas, permite que sejam realizadas estimativas de emissões atmosféricas do transporte, históricas e atuais, na escala de cidades. Outro aspecto que merece destaque é a representação das emissões de forma espacializada, ou seja, em mapas, com vistas à contribuição para estudos de modelagem da concentração atmosférica de poluentes. Este trabalho contribui positivamente à gestão da qualidade do ar e redução de GEE no país, principalmente no tocante ao desenvolvimento de inventário de emissões atmosféricas na escala das cidades.

No caso específico de um possível aprofundamento do estudo em Belo Horizonte, na direção da elaboração de um inventário de emissões para o estudo da qualidade do ar, as seguintes recomendações podem ser identificadas (i) aprimorar a representação do universo de viagens na modelagem de transporte e emissões, com atenção especial às motocicletas e ao transporte de carga, (ii) extrapolar a modelagem de transporte e emissões para além da hora-pico-manhã, abrangendo o dia todo, (iii) extrapolar a modelagem de transporte e emissões para além do município, abrangendo toda a região metropolitana e (iv) estimar as emissões de GEE em bases anuais

As estimativas elaboradas para verificar o impacto das medidas do PlanMob-BH no consumo de energia e emissões atmosféricas demonstram ganhos expressivos para a cidade de Belo Horizonte. Estes ganhos são proporcionados pela implantação do conjunto de medidas previstas no plano e sua capacidade de promover a mudança modal de parte das viagens do transporte individual para o transporte coletivo, reduzindo seu ritmo de crescimento.

No Cenário 2020 com Investimento Pleno, quando é observada a divisão modal para a realização das viagens motorizadas, os automóveis teriam uma participação de 40%, os ônibus teriam 48% e o metrô teria 12% (Gráfico 1). Haveria assim uma estabilização da divisão modal existente em 2008 na cidade, aspecto importante diante da previsão de aumento da frota de automóveis para os próximos anos e da tendência de aumento de sua participação no conjunto de deslocamentos da população. Os resultados positivos são obtidos fundamentalmente pela redução do vkm da frota de automóveis em 2020 (1,8 milhão de vkm), em relação ao Cenário Tendencial (2,3 milhões de vkm). Este número é ligeiramente superior ao ano base de 2008, cuja estimativa é de 1,5 milhão de vkm (Gráfico 3).

No Cenário 2020 com Restrição de Investimentos (2020 RI), o consumo de combustível por automóveis é reduzido em 21%, em relação ao Cenário Tendencial. Já no Cenário 2020 Investimento Pleno (Transformador) a redução é ainda mais expressiva, atingindo 33% (Gráfico 12). Também há redução de consumo de combustível no caso dos ônibus, mas de forma menos

acentuada, chegando a 14% no Cenário 2020 com Restrição de Investimento e a 18% no Cenário 2020 com Investimento Pleno (Transformador). No caso dos ônibus, esta redução pode ser atribuída às mudanças tanto na frota quanto na sua forma de operação, necessárias para a implantação da rede de BRTs prevista no PlanMob-BH (Gráfico 12.)

As emissões de material particulado MP_{10} no Cenário Tendencial, quando são consideradas as emissões resultantes da queima de combustível e por desgaste de pneus, freios e pista; tem comportamento oposto nas frotas consideradas. As emissões da frota de automóveis as emissões são crescentes ao longo dos anos, enquanto a frota de ônibus as emissões apresentam tendência de redução. No Cenário 2020 com Investimento Pleno, o PlanMob-BH possibilita a redução das emissões da frota de ônibus, considerando aquelas resultantes da queima de combustível e desgaste, em relação ao ano de 2008 (12 $kgMP_{10}/h$ em 2020 e 22 $kgMP_{10}/h$ em 2008, conforme gráfico 16) . Há redução das emissões da frota de automóveis em relação ao Cenário Tendencial, mas elas se estabilizam em patamares ligeiramente superiores ao do ano de 2008 (39 $kgMP_{10}/h$ em 2020 e 34 $kgMP_{10}/h$ em 2008, conforme Gráfico 16). Estes números são expressivos, mas deve-se destacar novamente que, diferentemente das emissões de material particulado por combustão, não há regulação para as emissões de desgaste e são desconhecidos os estudos nacionais que investigam estas emissões. O próprio Inventário Nacional (MMA, 2014) aponta para a necessidade de explorar melhor o tema.

As emissões de Óxidos de Nitrogênio (NO_x) tendem a diminuir no horizonte temporal do PlanMob-BH devido aos aprimoramentos tecnológicos nos veículos e a incorporação de ônibus mais novos na operação do transporte público. A realização do Cenário 2020 Transformador poderia acelerar ainda mais esta queda, com a emissão de 388 $kgNO_x/h$ provenientes da frota de ônibus e 166 $kgNO_x/h$ provenientes da frota de automóveis, o que totalizaria cerca de 554 $kgNO_x/h$, representando uma redução de 19% em relação ao Cenário Tendencial, de 700 $kgNO_x/h$. (Gráfico 15). O comportamento das emissões de hidrocarbonetos não-metano (NMHC) tem comportamento semelhante ao NO_x , com tendência de redução decorrentes do aprimoramento tecnológico previsto para os próximos anos no país. A implantação do Cenário 2020 com Investimento Pleno também pode acelerar esta redução em 22%, quando comparadas com o Cenário Tendencial (Gráfico 16).

A redução de emissões de gases de efeito estufa é diretamente proporcional à redução de queima de combustíveis de origem fóssil. Nota-se que as emissões totais de CO_2 permanecessem praticamente constantes, quando são comparados os resultados do Cenário 2020 Transformador e o Cenário Base de 2008. Se as medidas previstas no Cenário 2020 com Restrição de Investimentos fossem implementadas, haveria uma redução de 37 tCO_2/h emitidas pela frota de automóveis e 11 tCO_2/h emitidas pela frota de ônibus, que representa uma redução total de 19% em relação ao Cenário Tendencial. Já no Cenário 2020 IP (Transformador), haveria uma redução de 101 tCO_2/h nas emissões da frota de automóveis e 25 tCO_2/h na frota de ônibus. Em 2020, as emissões totais de CO_2 , que seriam de 450 tCO_2/h no Cenário Tendencial para os dois tipos de frota de veículos, são reduzidas para 319 tCO_2/h , representando uma redução de 28% (Gráfico 17).

O resultado obtido no Cenário 2020 com Investimento Pleno é próximo ao estimado para o ano base de 2008, de 302 tCO_2/h , o que representa uma estabilização das emissões de CO_2 no transporte de passageiros do sistema de mobilidade urbana. Esta estabilização das emissões da cidade de Belo Horizonte é obtida somente pelas mudanças em seu sistema de mobilidade urbana, seja na participação dos diferentes modos de transporte na divisão modal de viagens ou na racionalização da rede de transporte público, sem alteração da fonte de energia ou a tecnologia dos veículos utilizados no transporte coletivo.

O planejamento da mobilidade urbana, com a mudança modal do transporte individual para o transporte coletivo, pode ser um grande aliado às políticas ambientais que têm como foco o aprimoramento da tecnologia veicular e dos combustíveis dos automóveis. As expressivas reduções de CO₂ obtidas pelo PlanMob-BH e a sua estabilização em 2020, nos níveis de emissões do ano de 2008, estimulam uma reflexão sobre os instrumentos previstos em várias leis municipais dedicadas à reduzir a emissão de gases de efeito estufa. As reduções promovidas pelo plano são obtidas pela melhoria operacional do transporte público e da mudança modal, sem a alteração da tecnologia veicular e do combustível usado atualmente na frota de ônibus.

O potencial de redução de emissões é um co-benefício da reorganização do sistema de mobilidade urbana, que tem como principal objetivo a melhoria da acessibilidade para todas as pessoas. As mudanças proporcionadas pelo PlanMob-BH podem inclusive proporcionar condições para a redução de custos operacionais do transporte coletivo, o que pode não acontecer quando a redução de emissões do transporte coletivo é buscada apenas na alteração da tecnologia veicular ou o combustível do ônibus.

Os resultados do estudo sobre o consumo de energia, emissões de poluentes atmosféricos (MP₁₀, NO_x, NMHC) e CO₂ são projeções que apontam ser correta a adoção do plano de mobilidade urbana como um instrumento de gestão ambiental, que articule a melhoria da acessibilidade das pessoas com a redução dos impactos ambientais do sistema de mobilidade urbana. Os expressivos resultados obtidos pela implementação do PlanMob-BH, chamam a atenção para o papel que os planos municipais de mobilidade podem ter, quando são articuladas as políticas de mobilidade urbana qualidade do ar e mudança climática, no âmbito municipal, permitindo a adoção de metas ambientais na sua elaboração e implementação.

6. Referências

- Belo Horizonte, 2009. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. Inventário municipal de gases de efeito estufa – relatório final. Disponível em: http://www.pbh.gov.br/smpl/PUB_P015/Relatório+Final+Gases+Estufa.pdf. Acesso em 28 abr 2014.
- Brasil, 2013. Plano Setorial de Transporte e de Mobilidade Urbana para a Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima. Ministério das Cidades & Ministério dos Transportes, 2013.
- Brasil, 2014. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013, Ano Base 2012. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Brasília, 2014.
- EEA. European Environment Agency. Exhaust emissions from road transport annex HDV files – EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook. 2013.
- IEA - International Energy Agency. Schipper et al. Flexing the Link between Transport and GHG Emissions. Paris, 2000.
- IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente. 1º Diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil. 2014.
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Ensaio Comparativos de Ônibus Urbanos. Relatório Técnico Nº. 91.377-205. 2007
- Miranda, R.M., Andrade, M.F., Fornaro, A., Astolfo, R., Afonso de André, P., Saldiva, P.H. Urban air pollution: a representative survey of PM_{2.5} mass concentrations in six Brazilian cities. *Air Quality, Atmosphere & Health*, vol.55, n.1, pp. 63-77, 2012.
- Olmo, N.R.S., Saldiva, P.H., Braga, A.L.F., Lin, C.A., Santos, U.P., Pereira, L.A.A. A review of low-level air pollution and adverse effects on human health: implications for epidemiological studies and public policy. *Clinics*, vol.66, n.4, pp. 681-690, 2011.
- Spiess, H. Enif – Toward a New Interface for EMME/2. Aegerten, Switzerland, 2000.