

Investigação dos impactos decorrentes da readequação da velocidade regulamentar sobre a emissão veicular de CO₂



Márcia Eduarda Santos Rodrigues

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes
da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Brasil.

Jairo Ivo Brito

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes
da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Brasil.

Bruno Vieira Bertoncini

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes
da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Brasil.

Julie Anne Holanda Azevedo

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia
Afro-Brasileira. Fortaleza, Brasil.

Recibido: 31.01.2025. Aceptado: 27.04.2025.

Resumo

O Sistema de Transportes tem sido um dos maiores responsáveis pelo avanço e intensificação da poluição atmosférica. Este estudo investigou os efeitos da readequação de velocidade regulamentar nas emissões de poluentes veiculares em vias urbanas, com foco no dióxido de carbono (CO₂). Os dados foram coletados em uma Avenida em Fortaleza, Ceará, Brasil, antes e depois da readequação da velocidade de 60 para 50 km/h, com uso de tecnologia embarcada em veículo. As análises dos cenários foram *ex-ante* e *ex-post* e os resultados sugeriram que após a redução da velocidade para o período de tráfego menos intenso do dia, houve impacto na redução significativa das emissões médias de CO₂ em 7,2%. Essas descobertas indicam que readequar a velocidade regulamentar em vias urbanas pode contribuir como parâmetro orientador de decisões e estratégias de planejamento de tráfego, com ênfase na melhoria da qualidade do ar local e redução dos números de óbitos e Doenças Crônicas não Transmissíveis (DCNT) na saúde humana.

PALAVRAS-CHAVES: EMISSÕES DE POLUENTES VEICULARES. EQUIPAMENTOS EMBARCADOS. READEQUAÇÃO DA VELOCIDADE REGULAMENTAR.

Investigation of the impacts resulting from the readjustment of the regulatory speed on vehicle CO₂ emissions

Abstract

The Transportation System has been one of the major contributors to the advancement and intensification of air pollution. This study investigated the effects of adjusting the regulatory speed on vehicle pollutant emissions on urban roads, focusing on carbon dioxide (CO₂). Data was collected on an avenue in Fortaleza, Ceará, Brazil, before and after the adjustment of the speed from 60 to 50 km/h, using onboard vehicle technology. The analyses of the scenarios were ex-ante and ex-post, and the results suggested that after reducing the speed for the less intense traffic period of the day, there was a significant impact on the reduction of average CO₂ emissions by 7.2%. These findings indicate that adjusting the regulatory speed on urban roads can contribute as a guiding parameter for traffic planning decisions and strategies, with an emphasis on improving local air quality and reducing the numbers of deaths and Non-Communicable Chronic Diseases (NCDs) in human health.

KEYWORDS: VEHICLE POLLUTANT EMISSIONS. ONBOARD EQUIPMENT. ADJUSTMENT OF REGULATORY SPEED.

Introdução

De acordo com o Global Plan: Decade of Action for Road Safety, as vias urbanas cujas velocidades regulamentares excedem 30 km/h comprometem a segurança viária de todos os seus usuários: pedestres, condutores de veículos motorizados e não-motorizados (OMS, 2021). Desta maneira, a 3ª Conferência Mundial sobre Segurança Viária reuniu 140 países, dentre eles o Brasil, com o intuito de reduzir em 50% as lesões fatais ocorridas no trânsito até 2030. Para isso, sugeriu-se no documento denominado Declaração de Estocolmo alterar, no mínimo, de 60 km/h para 50 km/h o limite regulamentar da velocidade (OMS, 2020).

A readequação da velocidade regulamentar, potencializada por programas como o Visão Zero, Abordagem para um Sistema Seguro e a Segurança Sustentável, reduziu em 45% os acidentes fatais nas vias urbanas da Noruega e em 25% a estatística de pedestres mortos em Zurique – Suécia. Sob esse raciocínio, estudos de caso feitos na Austrália constataram que houve redução de 40% dos acidentes fatais nas vias urbanas coletoras e arteriais após 10 anos que o limite de velocidade foi reduzido (EMBARQ, 2015). Outro efeito dessa intervenção no tráfego, para além da temática de segurança viária, está relacionado à redução de mortes e Doenças Crônicas não Transmissíveis (DCNT).

A relação do comportamento do tráfego com a saúde humana pode ser observada no relatório do Instituto de Saúde e Sustentabilidade publicado por pesquisadores da USP (Universidade de São Paulo), que apresenta estimativa de 256 mil pessoas afetadas pela poluição do ar até 2030 em São Paulo. De acordo com os boletins epidemiológicos da Secretaria da Saúde do Estado do Ceará (SESA, 2019), houve um aumento na proporção de óbitos por doenças respiratórias crônicas, como a Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC), de 2,4% em 1998 para 4,4% em 2018. Paralelo a isso, o Departamento

Investigação dos impactos decorrentes da readequação da...

M. E. SANTOS RODRIGUES, J. IVO BRITO, B. VIEIRA BERTONCINI, J. A. HOLANDA AZEVEDO

Nacional de Trânsito (DENATRAN) publicou o crescimento de 110% da frota de veículos no Ceará nesse período (Rodrigues *et al.*, 2015; Viana; Mesquita, 2019).

Tem-se conhecimento que a medida de gestão do trânsito de reduzir os limites das velocidades regulamentares gera impactos na dinâmica dos centros urbanos e no comportamento dos condutores. Com isso, a condução dos veículos se torna mais homogênea, com redução do consumo de combustível e das emissões de CO_2 . O impacto também é verificado em outros poluentes atmosféricos como Óxidos de Nitrogênio (NOx) e Hidrocarbonetos não queimados (HC), que tendem a reduzir (Soriguera, 2017; Smith *et al.*, 2018; Gao *et al.*, 2020).

Por meio dos estudos de Barlow *et al.* (2009) e Azevedo (2019), sabe-se que a velocidade, assim como aceleração e outros, são um dos fatores que influenciam a emissão de poluentes veiculares. Os picos de emissão de CO_2 , por exemplo, são associados na operação de aceleração agressivas durante a condução, ocorridas constantemente em interseções urbanas, da mesma forma como em eventos recorrentes de *stop and go* (EEA, 2016; Capiello, 2002; Roso, 2016; Azevedo *et al.*, 2017).

De acordo com os prognósticos do Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), os estudos apontam que as concentrações de CO_2 podem ultrapassar 1.200 ppm até o final deste século, valor que supera em cerca de 75% os níveis da era pré-industrial. Nesse aspecto, o Setor de Transportes é a segunda maior fonte de emissões de poluentes antropogênicas depois do Setor de Energia. Dentre as emissões globais de Gases do Efeito Estufa (GEE), o Sistema de Transportes é responsável por cerca de 24% das emissões de CO_2 (IPCC, 2021). De forma paralela e de acordo com o Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA, 2020), a participação desse setor corresponde a 38% das emissões de poluentes no grupo do setor de Energias no Brasil.

Diante dessa temática, o objetivo desse trabalho é investigar os efeitos da redução da velocidade regulamentar sobre os níveis de emissões de poluentes veiculares em vias urbanas e comparar o comportamento das emissões do poluente CO_2 antes e após a readequação da velocidade regulamentar. Salienta-se que as justificativas para este estudo estão associadas ao fato do CO_2 estar relacionado a inúmeras políticas públicas, tal como os Mercados de Carbono e por ser um dos gases mais importantes vinculados às mudanças climáticas, assim como contribuinte para o aquecimento global.

O presente artigo está dividido em 4 seções incluindo a introdução. Na sequência, está ilustrado o método aplicado para desenvolvimento do estudo. Após isso, os resultados encontrados e discussões pertinentes ao tema. Por fim, as considerações finais, orientações para estudos futuros e limitações da pesquisa.

Método

Para o íntegro desenvolvimento deste trabalho e alcance dos objetivos específicos, assim como obtenção de respostas para as questões motivadoras, processa-se esta sequência, com descrição dos materiais, ferramentas e método aplicado, adaptado do Cassiano (2016), conforme a Figura 1. Em síntese, o método da pesquisa se dividiu em onze

Investigação dos impactos decorrentes da readequação da...

M. E. SANTOS RODRIGUES, J. IVO BRITO, B. VIEIRA BERTONCINI, J. A. HOLANDA AZEVEDO

etapas com desenvolvimento de um estudo de caso para comparar as emissões de CO_2 em dois contextos: antes e após a readequação da velocidade regulamentar de 50 para 60 km/h em uma via urbana da cidade de Fortaleza, Ceará, Brasil. Cada etapa sinalizada no fluxograma será descrita ao longo desta seção.

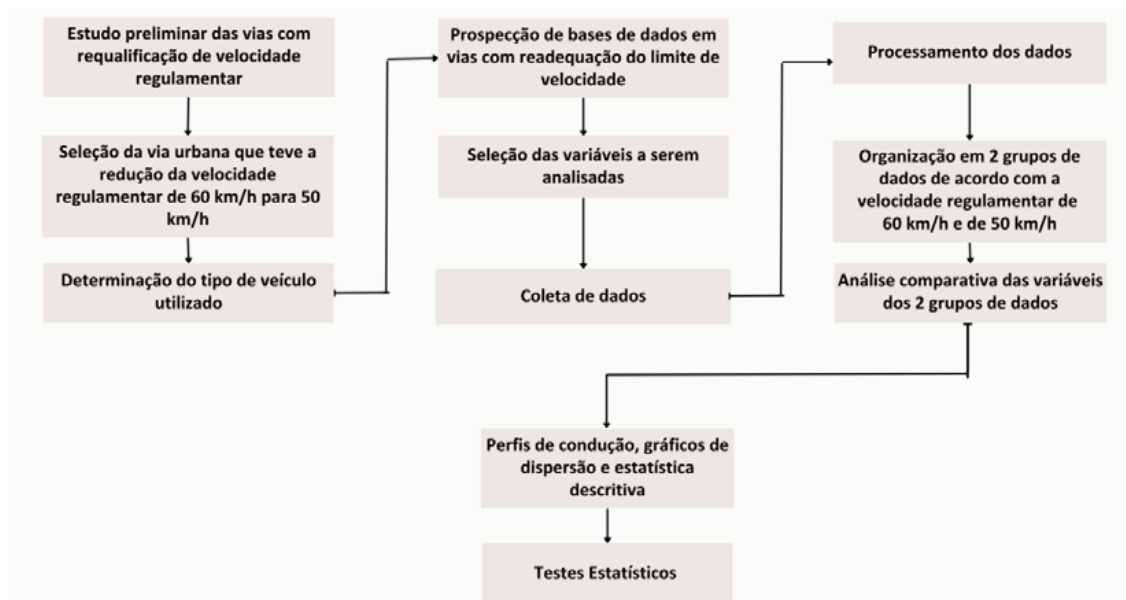


Figura 1. Etapas do método aplicado adaptada de Cassiano (2016). Fonte: autores (2023).

Estudo de vias com velocidade readequadas

O estudo ocorreu mediante a identificação das vias urbanas com jurisdição municipal e estadual. Com isso, foi feito o levantamento das vias cujos limites de velocidade foram readequados. Nesta etapa metodológica foram identificados também outros tipos de intervenções, tais como: alargamentos de faixas, modificação do revestimento, implantação de semáforos, entre outras. Isso com o intuito de isolar outras variáveis que influenciam o tráfego e os níveis de emissões de poluentes locais.

Seleção da via urbana

A via urbana foi escolhida dentro do contexto de intervenção no tráfego de redução do limite de velocidade regulamentar de 60 km/h para 50 km/h. A localização desse trecho está apresentada na Figura 2 e pode ser caracterizada com: uso e ocupação do solo misto com classificação hierárquica coletora; possui 2 faixas de tráfego em cada um dos dois sentidos, separados por canteiro central, Oeste-Leste e Leste-Oeste (chamados de ida e volta ao longo do trabalho, respectivamente) que compreendem, juntos, 5,0 km de extensão; contém 10 semáforos por sentido ao longo do trecho estudado. A readequação do limite de velocidade ocorreu em 2021 (Prefeitura Municipal de Fortaleza, 2021).

Investigação dos impactos decorrentes da readequação da...

M. E. SANTOS RODRIGUES, J. IVO BRITO, B. VIEIRA BERTONCINI, J. A. HOLANDA AZEVEDO



Figura 2. Localização do trecho do Estudo de Caso. Fonte: autores (2023).

Outros trabalhos consideraram essa via para análises, tais como: Cassiano (2016) que avaliou as emissões poluentes de um veículo Flex em percurso real urbano para as misturas de combustíveis E27, E85 e E100; Azevedo (2019) propôs um método para elaboração de fatores de emissão de poluentes veiculares, em veículos urbanos de carga, considerando perfis de condutores distintos e incorporando os aspectos locais; e Bertoncini (2021) analisou a relação entre a classificação funcional viária e o perfil de emissão de poluentes veiculares, no caso CO_2 .

Destaca-se, ainda, a presença de polos geradores de viagens em seu entorno ao longo de toda a sua extensão, por possuir facilitadores, como: residências, igrejas, supermercados, farmácias, agências bancárias, escolas, bares e restaurantes. Além disso, possui interseções com vias arteriais que possuem fluxo intenso, de acordo com o *Google Transit*: Avenida Humberto Monte e Avenida 13 de Maio.

Veículo utilizado

O veículo utilizado no experimento foi do tipo leve de passeio, *flex-fuel*, automático com motorização 2.0 L, o qual se enquadra nas estatísticas da Associação Nacional dos Fabricantes de veículos Automotores (ANFAVEA), cuja tecnologia *flex-fuel*, em 2019, esteve presente em 87% dos novos veículos leves licenciados no Brasil. Além disso, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020) fez projeções nas quais, até 2030, ela deve atingir cerca de 46,7 milhões de veículos novos, com crescimento a uma taxa de 2% ao ano.

Prospecção de base de dados

Para esta etapa metodológica, a base de dados explorada é derivada da pesquisa do Casiano (2016), cuja coleta de dados ocorreu na mesma via urbana selecionada no Estudo de Caso para este trabalho com os dados agrupados em dois períodos do dia: Fora Pico e Hora Pico. Para o conjunto desses dados prospectados, denominou-se: Grupo de Dados 1. É relevante mencionar, ainda, que o veículo utilizado nesta base de dados prospectada possui a mesma tecnologia *flex-fuel* do Estudo de Caso deste trabalho.

Seleção das variáveis

Para o estudo de cunho comparativo, optou-se por investigar as variáveis recorrentes em trabalhos como Bertoncini *et al.* (2021), Zhai *et al.* (2022) e Li *et al.* (2022), inclusive na base de dados prospectada: velocidade, aceleração e o poluente CO_2 . Associadas a essas, a latitude e longitude foram importantes para identificação da posição geográfica das observações, assim como o tempo, em segundos, de cada registro das variáveis.

Coleta de dados

A técnica de coleta de dados aplicada neste Estudo de Caso foi o Sistema Portátil de Medição de Emissões (PEMS) e as observações foram realizadas nos dias típicos de acordo com Liu *et al.* (2014): terça, quarta e quinta-feira, divididas em dois turnos: manhã das 8:00h às 9:00h e tarde das 13:00h às 14:00h, com exclusão das semanas em que houve feriados e/ou eventos excepcionais. Nesta ordem, os horários estão associados aos períodos de maior e menor intensidade do tráfego na via, conforme dados do Google Transit.

Os equipamentos embarcados representaram as condições reais de emissões veiculares do tráfego com dados em uma frequência de 1Hz, com total de 50 viagens em nove dias e mais de 15.000 observações. Inclui-se a esta etapa, a esquematização dos parâmetros do sistema de coletas representados na Figura 3.

Sobre o conjunto de equipamentos e ferramentas utilizadas para obtenção dos dados desta pesquisa, tem-se: o analisador de gases, cuja função foi captar as emissões de gases poluentes, tais como o CO , CO_2 , O_2 , NO_x e HC , com dados desagregados e na frequência de 1Hz; Desumidificador ligado à sonda por meio do tubo prolongador, com função de controlar a umidade do ar e garantir que somente o fluxo dos gases cheguem até o analisador, que também estava conectado com ele. Além disso, possuía uma vazão de água que foi transportada por uma mangueira até um recipiente; computador portátil para a leitura dos dados coletados no analisador de forma instantânea; GPS agregado a um smartphone Android por meio do aplicativo *OruxMaps*; sonda fixada no escapamento do veículo e composta por tubo extensor, no qual a ligava ao desumidificador e analisador de gases e o conjunto de 3 baterias em paralelo de 12V cada, que forneciam cerca de 1:30h de energia para os equipamentos.

Investigação dos impactos decorrentes da readequação da...

M. E. SANTOS RODRIGUES, J. IVO BRITO, B. VIEIRA BERTONCINI, J. A. HOLANDA AZEVEDO

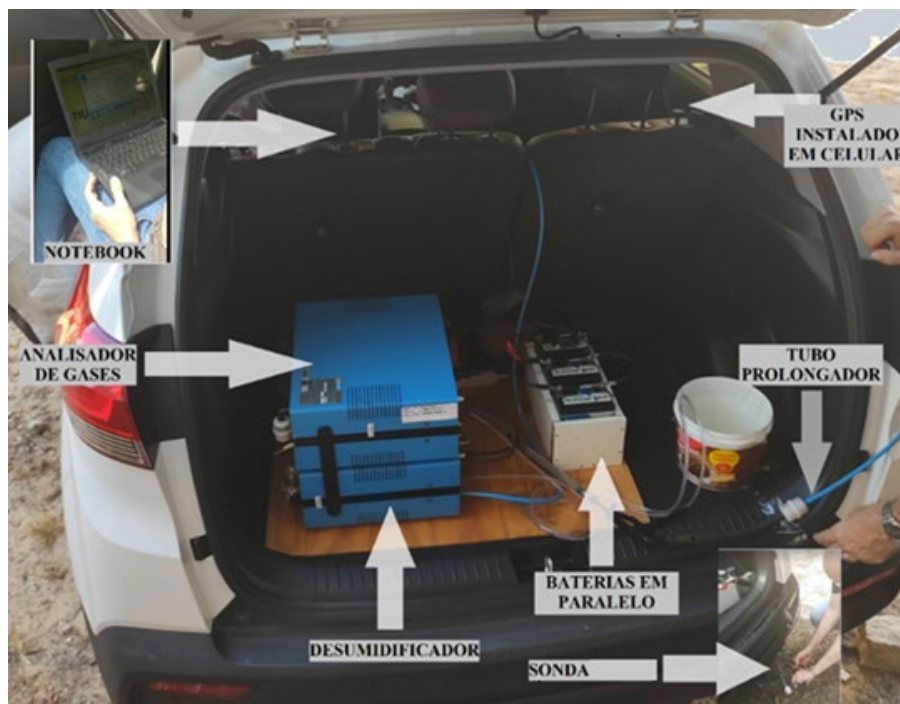


Figura 3. Montagem dos materiais e equipamentos embarcados no veículo teste.

Fonte: autores (2023).

A sistematização geral da coleta de dados é explanada na Figura 4.

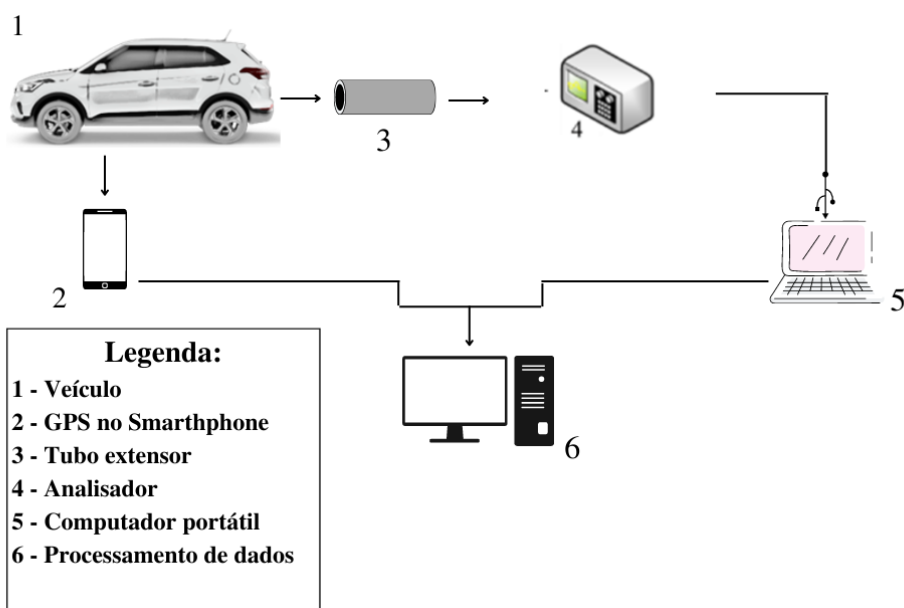


Figura 4. Sistematização geral de coleta. Fonte: adaptado Cassiano (2016).

Investigação dos impactos decorrentes da readequação da...

M. E. SANTOS RODRIGUES, J. IVO BRITO, B. VIEIRA BERTONCINI, J. A. HOLANDA AZEVEDO

A sistematização da coleta ocorreu mediante a coleta dos gases do escapamento pela sonda e desumidificação, com leitura no analisador de gases. De forma paralela, o GPS permitia a identificação das coordenadas geográficas de cada ponto coletado no trecho do Estudo de Caso. Os dados eram armazenados no computador portátil e processados ao fim das coletas.

Processamento e organização dos dados

Os dados utilizados de Cassiano (2016) foram: data, hora, latitude, longitude, tempo, velocidade, aceleração e emissões de CO_2 , de acordo com o período do dia: hora pico (HP - maior intensidade do tráfego) e fora pico (FP - menor intensidade do tráfego). Para fins de processamento, nomeou-se esses dados de Grupo de Dados 1 em alusão ao cenário anterior à readequação da velocidade regulamentar na via.

Em relação aos dados coletados no cenário atual após a readequação da velocidade na via, foram feitas sincronizações entre os dados obtidos do GPS e do analisador de gases. Nomeou-se os dados referentes ao contexto de velocidade regulamentar como Grupo de Dados 2. Além disso, fez-se a conversão da unidade de medida do CO_2 de% do volume do gás do escapamento para PPM, de acordo com a Equação 1.

$$\text{De \% para ppm:} \quad ppm_i = \%_i * 10000 \quad (1)$$

Onde:

i = Concentração instantânea de CO_2 coletada na frequência de 1Hz pelo Analisador de Gases.

Análise dos dados

A análise dos dados foi realizada comparando os cenários ex-ante (antes da intervenção) e ex-post (após a intervenção). Segundo Bigazzi e Rouleau (2017), existem lacunas na literatura no que se refere às avaliações dos impactos das intervenções no tráfego, especialmente no que diz respeito à comparação dos dados antes e depois dessas mudanças. Para superar essas lacunas, a análise preservou os principais parâmetros que influenciam as emissões de CO_2 .

Foi realizada uma análise estatística descritiva utilizando o software R, com os dados agrupados com base na intensidade do tráfego, considerando dois períodos: maior e menor intensidade. Foram analisados dois grupos de dados: Grupo de Dados 1 (antes da readequação da velocidade) e Grupo de Dados 2 (após a readequação da velocidade). Os parâmetros estatísticos calculados foram as medidas de tendência central (média e mediana), dispersão (desvio padrão e variância), além dos valores mínimo e máximo.

Produtos das análises

Para fins de discussões dos resultados, foram obtidos produtos das análises, tais como: distribuição espacial das observações dos dois grupos de dados, posterior e anterior à readequação da velocidade regulamentar, na ferramenta QGIS; perfis de velocidade de dadas amostras de viagens; e gráfico de dispersão das emissões veiculares de CO₂ de forma a comparar os cenários estudados.

Testes estatísticos

Por fim, os testes de hipóteses para verificar se houve diferença nas médias das emissões do poluente CO₂, por meio do software R em dois contextos: período de maior e menor intensidade do tráfego. Foi utilizado o teste *T-Student* para diferenças de médias.

Resultados e Discussões

Os resultados apresentados nesta seção refletem a investigação comparativa dos cenários anterior e posterior à readequação do limite regulamentar da velocidade para a via urbana estudada em dois períodos distintos do dia relativos à intensidade do tráfego. Na Tabela 1, as medidas de tendência central e dispersão dos dados para os dois contextos analisados da via para as emissões do poluente CO₂ foram elucidados.

Tabela 1. Estatística Descritiva das emissões de CO₂ (ppm 10⁶). Fonte: autores (2023)

Parâmetro	Maior intensidade do tráfego		Menor intensidade do tráfego	
	60 km/h	50 km/h	60 km/h	50 km/h
Média	1,351	1,364	1,449	1,345
Mediana	1,429	1,35	1,500	1,350
Desvio padrão	0,213	0,115	0,125	0,098
Mínimo	0,254	0,580	0,815	0,300
Máximo	1,511	1,540	1,574	1,550

Observou-se que para diferentes períodos de intensidade do tráfego os efeitos sobre a emissão de CO₂ variam. Quando a densidade do tráfego estava menor, a média de emissões de CO₂ reduziu 7,18% e se mostrou menos dispersa no cenário em que o limite de velocidade operacional foi reduzido para 50 km/h. Com 5% de nível de significância, não há evidências estatísticas para aceitar a hipótese nula, em que as médias para os dois cenários de limites de velocidade regulamentar para o período de menor intensidade do tráfego são iguais. Por isso, o resultado e conclusão desse teste de hipóteses é rejeitar a hipótese nula e considerar que houve de fato a redução da média. Isso porque, no teste *T-Student* para diferenças de médias, o *p-value* de $2,2 \times 10^{-16}$ é menor que 0,05, o que indica que a hipótese nula será rejeitada. Por outro lado, para a conjuntura de maior intensidade do tráfego, não houve diferença significativa entre as emissões de CO₂.

Investigação dos impactos decorrentes da readequação da...

M. E. SANTOS RODRIGUES, J. IVO BRITO, B. VIEIRA BERTONCINI, J. A. HOLANDA AZEVEDO

As Figuras 5 e 6 apresentam quatro perfis de velocidade para dada amostra de viagem. Sendo divididas em dois eixos: um para o cenário em que o limite regulamentar era 60 km/h e outro para representar o atual de 50 km/h com consideração do período de intensidade do tráfego (maior ou menor intensidade).

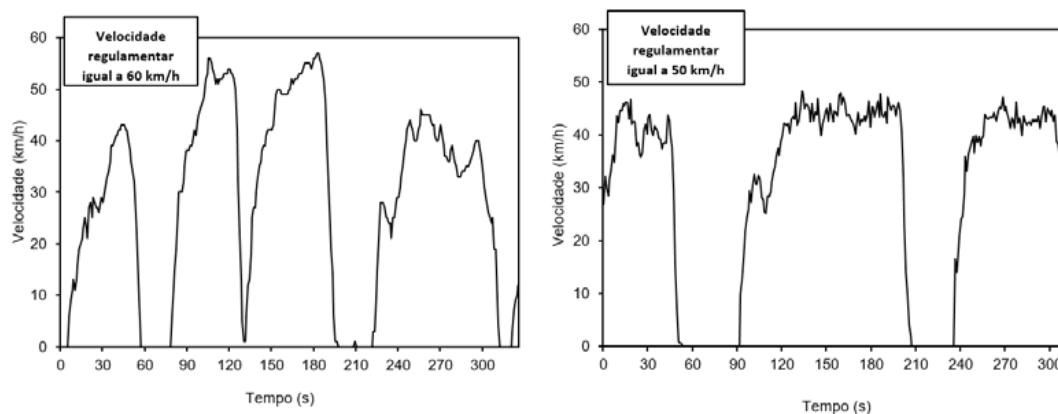


Figura 5. Perfis de velocidade da via no horário de menor intensidade do tráfego.
Fonte: autores (2023).

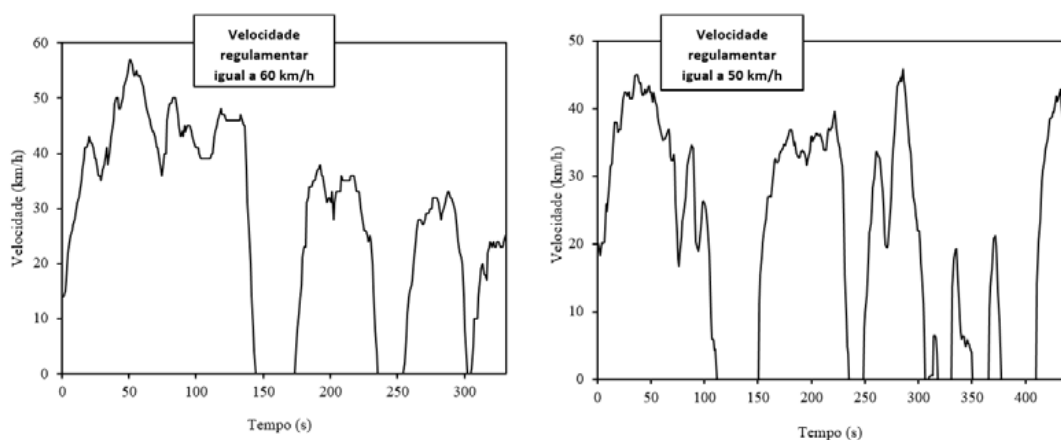


Figura 6. Perfis de velocidade da via no horário de maior intensidade do tráfego.
Fonte: autores (2023).

Percebeu-se, pelos perfis de velocidade, que durante os períodos cujo tráfego estava com menor intensidade, as velocidades se mantiveram próximas aos seus respectivos limites operacionais. Em contrapartida, no cenário anterior, é notória a presença de maiores picos de velocidade, seguidos de desacelerações. Neste caso, o maior limite de velocidade remeteu ao fato de o condutor possuir maior faixa para acelerar, mesmo que por um curto intervalo de tempo, o que resultou em maiores emissões de CO_2 . Quando se observa o gráfico da redução do limite da velocidade, percebe-se momentos de acelerações e desacelerações mais harmônicas, o que reflete homogeneidade na condução entre os veículos.

Notou-se que o comportamento dos dois gráficos na Figura 6 apresenta semelhança, picos de velocidade, seguidos de desacelerações agressivas e condução variável. Por outro lado, para o período de maior intensidade do tráfego, os perfis de velocidade

Investigação dos impactos decorrentes da readequação da...

M. E. SANTOS RODRIGUES, J. IVO BRITO, B. VIEIRA BERTONCINI, J. A. HOLANDA AZEVEDO

contribuem para os resultados encontrados na Tabela 1. Em concordância, a análise da variável velocidade não foi suficiente para impactar na emissão de CO_2 quando se tinha maiores volumes de veículos na via.

As Figuras 7 e 8 agregam essa discussão pelo fato de apresentarem o comportamento das emissões de CO_2 para os Grupos de Dados 1 e 2 nos dois períodos do dia considerados na análise. Com o *violin plot* é possível perceber a dispersão do poluente estudado e associar aos comportamentos da variável velocidade demonstrados pelos perfis de condução.

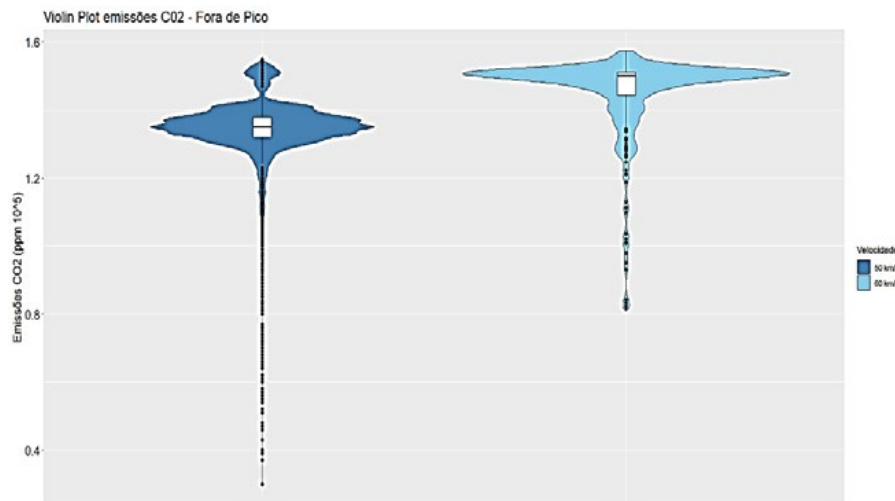


Figura 7. Dispersão das emissões de CO_2 no período de menor intensidade do tráfego. Fonte: autores (2023).

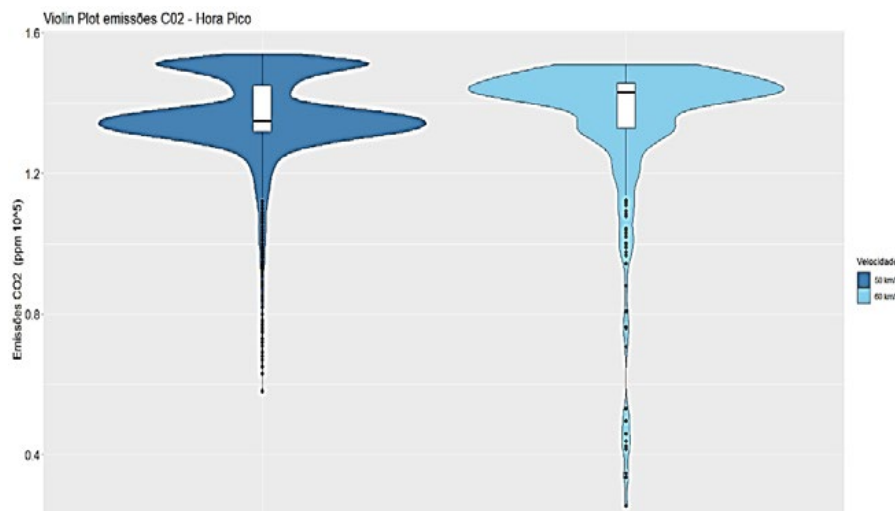


Figura 8. Dispersão das emissões de CO_2 no período de maior intensidade do tráfego. Fonte: autores (2023).

Pela Figura 7, visualiza-se maior simetria para o Grupo de Dados 2 (com limite de velocidade 50 km/h), em que é visto pela média aritmética próxima à mediana. Outro

Investigação dos impactos decorrentes da readequação da...

M. E. SANTOS RODRIGUES, J. IVO BRITO, B. VIEIRA BERTONCINI, J. A. HOLANDA AZEVEDO

aspecto interessante é que na condição operacional atual da via, o terceiro quartil se encontra mais distante do valor máximo dos dados, o que implica que 75% das emissões ocorrem abaixo de 1,38 (10^5) ppm, enquanto para o Grupo de Dados 1 (com limite de velocidade 60 km/h), isso ocorre abaixo do valor 1,51 (10^5) ppm.

Portanto, esse nível médio mais baixo de emissões de CO_2 , com menores dispersões, condizem com o impacto de melhoria na qualidade do ar que a readequação da velocidade regulamentar proporcionou para o período menos intenso do tráfego na via.

Pela Figura 8, o Grupo de Dados 1, com limite de velocidade de 60 km/h, foi caracterizado com o comportamento das emissões de CO_2 com uma distribuição assimétrica positiva dos dados, pois a mediana se encontra próxima ao terceiro quartil, enquanto para o Grupo de Dados 2 (limite de velocidade de 50 km/h), a distribuição dos dados é assimétrica negativa. O impacto dessa análise é devido a média aritmética ser uma medida de tendência central sensível aos valores extremos. Portanto, a mediana se torna um parâmetro mais indicado quando o comportamento da distribuição dos dados é assimétrico, conforme este caso. Desta forma, convém citar que houve redução do valor da mediana em 5,59% para o Grupo de dados 2 em relação ao 1.

Verificou-se, inclusive, que o terceiro quartil dos dados das viagens do contexto atual da via, associado à redução da mediana, está mais distante do valor máximo apresentado no gráfico. Isso implica que a incidência de maiores níveis de emissões de CO_2 foi diminuída e com isso há o favorecimento de melhores condições da qualidade do ar local.

As Figuras 9 e 10 contrastam e demonstram a distribuição dos valores médios para as viagens dos Grupo de Dados 1 e 2. Correlacionou-se as variáveis velocidade e emissões de CO_2 , por meio de graduação dos resultados médios de cada segmento em um espectro de cores, nas quais a verde apresenta níveis menores de CO_2 e o vermelhos níveis maiores deles. Em contrapartida, o espectro é invertido para a variável velocidade, cujos maiores valores são representados pelo verde claro e escuro.

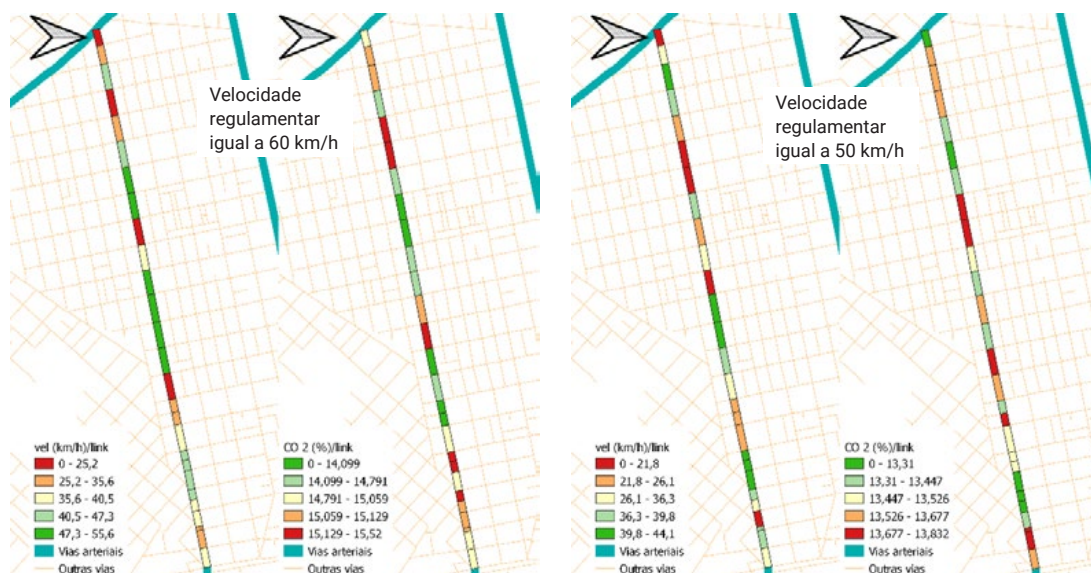


Figura 9 (a,b). Distribuição espacial dos grupos de dados 1 e 2 no horário de menor intensidade do tráfego. Fonte: autores (2023).

Investigação dos impactos decorrentes da readequação da...

M. E. SANTOS RODRIGUES, J. IVO BRITO, B. VIEIRA BERTONCINI, J. A. HOLANDA AZEVEDO

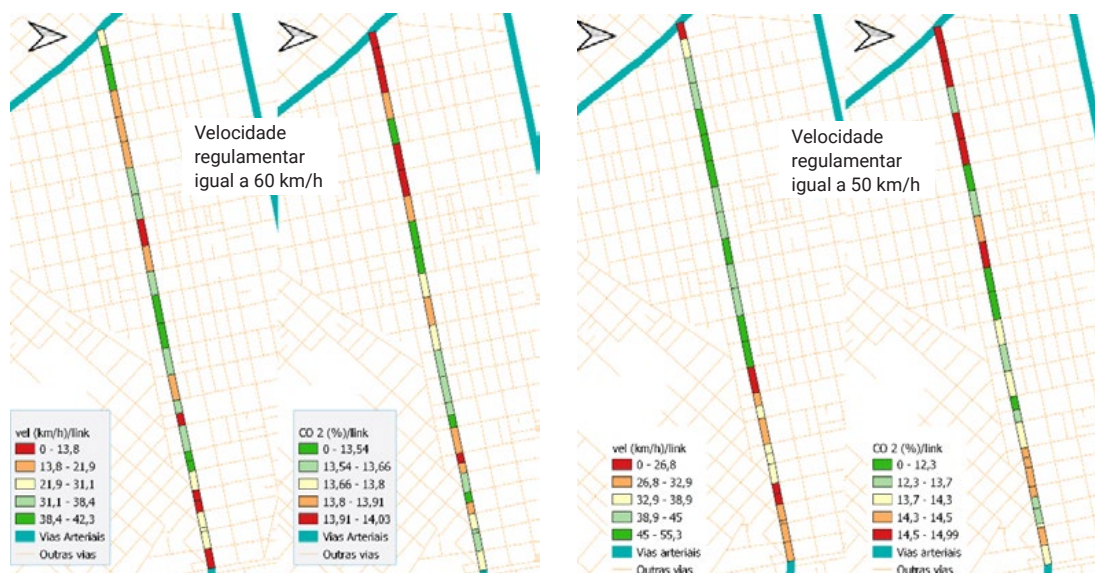


Figura 10 (a,b). Distribuição espacial dos grupos de dados 1 e 2 no horário de maior intensidade do tráfego. Fonte: autores (2023).

Com a análise da Figura 9 - b, uma das diferenças verificadas para a velocidade foi a diminuição de segmentos com graduações maiores para o Grupo de dados 2 em relação ao 1. O impacto da readequação da velocidade regulamentar sobre o comportamento da velocidade média do fluxo é explicado pelas teorias empíricas literárias sobre a homogeneização do tráfego Smulders (1990), Zackor (1991), van den Hoogen e Smulders (1994) e observado na comparação desses dois cenários deste trabalho. Outro aspecto importante a ser citado é que os níveis de CO_2 apresentam diminuição no trecho evidenciado, com graduações dos segmentos mais esverdeadas, além delas estarem com picos de emissões menores em relação ao demonstrado na Figura 9 - a.

Para os níveis médios de CO_2 nas duas menores graduações (cores esverdeadas), foi observado o aumento de 3,7% de segmentos com essas características para o Grupo de Dados 2. Observou-se que as maiores graduações de CO_2 ocorrem quando há mudanças agressivas na velocidade, sejam para acelerações ou desacelerações do veículo verificadas nos perfis de velocidade apresentados.

A análise dos mapas de distribuição da Figura mostrou que o comportamento das duas classes apresentadas na Figura 10 – a e b possui o mesmo percentual de segmentos para os maiores valores médios de emissões de CO_2 . Contudo, para o Grupo de Dados 2, os níveis médios do poluente se mantiveram baixos e/ou constantes em 3,8% dos segmentos a mais que o Grupo de Dados 1, isto implica dizer que as transições de velocidades ocorreram de forma mais suave no cenário atual da via. Somado ao fato de que foi verificada a diferença de 3,7% a mais de segmentos esverdeados com os menores valores médios de emissões de CO_2 para o Grupo de Dados 2 em relação ao 1.

Por fim, pelos produtos das análises discutidos, percebeu-se, nos perfis de velocidade para dada amostra de viagem, que durante os períodos cujo tráfego estava com menor intensidade, as velocidades se mantiveram próximas aos seus respectivos limites operacionais. Contudo, as emissões de CO_2 se distribuem espacialmente de forma mais homogênea após a readequação da velocidade regulamentar, com redução do valor

Investigação dos impactos decorrentes da readequação da...

M. E. SANTOS RODRIGUES, J. IVO BRITO, B. VIEIRA BERTONCINI, J. A. HOLANDA AZEVEDO

médio e menor frequência de valores mais altos. Salienta-se, ainda, que o comportamento do tráfego nesse período contribuiu para menores variações de velocidade e, como consequência, conduções menos agressivas.

Por outro lado, para o período de maior intensidade do tráfego, as presenças de picos de emissões de CO₂ ocorreram de forma semelhante, tanto para o cenário cuja velocidade regulamentar era de 60 km/h, quanto o atual em que é 50 km/h. Devido as presenças de momentos *stop and go*, seja pela quantidade de semáforos ou alta densidade do tráfego na via com congestionamentos, não foram observadas variações nas distribuições espaciais dos níveis do poluente. Contudo, o *violin plot* apresentou menor dispersão para o cenário do limite regulamentar da velocidade de 50 km/h.

Diante disso, embora o estudo de caso tenha ocorrido em uma única via urbana, as coletas resultaram em um volume de dados que indicam que a readequação do limite regulamentar da velocidade em via urbana tem efeito de redução das emissões de CO₂ no período de maior fluidez do tráfego, pois os condutores passam a trafegar de forma menos agressiva, com menor necessidade de trocas de marchas e reduções de picos de acelerações e desacelerações.

Considerações finais

A presente pesquisa propôs investigar os efeitos da redução da velocidade regulamentar sobre os níveis de emissões de poluentes veiculares em vias urbanas, assim como comparar o comportamento das emissões do poluente CO₂ antes e após a redução da velocidade regulamentar. As intervenções no trânsito em vias urbanas, tal como a redução da velocidade regulamentar, tornou-se temática importante da segurança viária e instrumento recorrente de controle do tráfego. Visto que isso afeta o comportamento do tráfego e, por consequência, o perfil de condução, as emissões de poluentes veiculares são impactadas. Diante disso, foi verificado menores níveis de emissões de CO₂ no cenário de menor intensidade.

Conclui-se que estudos desse tipo são importantes para o conhecimento do contexto da qualidade do ar e a compreensão de que cada localidade apresenta particularidades no comportamento do tráfego, os quais influenciam os níveis de poluentes veiculares emitidos pelos veículos. Outro desdobramento futuro é de caráter decisório, visto que essas investigações e análises servem de ferramentas para o processo de tomada de decisão por parte dos técnicos de planejamento e operação do tráfego, no que tange à compreensão dos efeitos que as intervenções na redução da velocidade ocasionam no comportamento dos condutores. Isso reflete em políticas públicas futuras que acionem medidas de controle, as quais sejam capazes de limitar e mitigar as taxas de emissões do poluente CO₂ locais, assim como reduzir as mortes causadas ou intensificadas pela poluição atmosférica. Por fim, propõe-se para pesquisas futuras avaliar os impactos da redução da velocidade de outros poluentes, tais como HC e NOX em vias urbanas. Acrescenta-se a análise comparativa para uma amostra de mais de um perfil de condução, com enfoque em avaliar os comportamentos das emissões de poluentes veiculares para diferentes condutores com a abordagem de ciclos de condução.

Investigação dos impactos decorrentes da readequação da...

M. E. SANTOS RODRIGUES, J. IVO BRITO, B. VIEIRA BERTONCINI, J. A. HOLANDA AZEVEDO

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES e FUNCAP pela concessão de bolsas e financiamento da pesquisa e ao Grupo de Pesquisa de Trânsito, Transporte e Meio-ambiente (GTTEMA-UFC).

Referências bibliográficas

- » Azevedo, J. A. H., Cassiano, D. R., Feitosa, B. B., de Oliveira, M. L. M., Lima, E. P., & Bertoncini, B. V. (2017). Influências dos modos de operação nas emissões de poluentes provenientes de veículos flex em região urbana. *Transportes*, 25(2), 91–100.
- » Azevedo, J. A. H. (2019). *Proposta metodológica para elaboração de fatores de emissão de veículos de carga a partir de perfis de condução* [Tese de doutorado, Universidade Federal do Ceará].
- » Barlow, T. J., Latham, S., McCrae, I. S., & Boulter, P. G. (2009). *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions* (PPR 354). TRL Limited.
- » Bertoncini, B. V., Quintanilha, W. F. L., Rodrigues, L. A., Cassiano, D. R., Ribeiro, J. P., & Ecavalcante, R. M. (2021). Onboard analysis of vehicle emissions in urban ways with different functional classifications. *Urban Climate*, 39, 10.
- » Bigazzi, A. Y., & Rouleau, M. (2017). Can traffic management strategies improve urban air quality? A review of the evidence. *Journal of Transport & Health*, 124.
- » Capiello, A. (2002). *Modeling traffic flow emissions* (M.Sc. thesis). Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- » Cassiano, D. R., Azevedo, J. A. H., Dias, H. L. F., Araujo, R. S., Cavalcante, F. S. A., Bertoncini, B. V., Policarpo, N. A., & Oliveira, M. L. M. (2016). MAMUTE: Monitoring AutoMotive Unit Transit Emissions Development and Application for Flex-fuel and Diesel Vehicles. Em M. Helfert & O. Gusikhin (Eds.), *II International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems* (pp. 237–244). SCITEPRESS Science and Technology Publications.
- » Embarq Brasil. (2015). *Impactos da redução dos limites de velocidade em áreas urbanas*. <https://www.mobilize.org.br/midias/pesquisas/impactos-da-reducao-dos-limites-de-velocidade.pdf>
- » Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2020). *Demanda de energia dos veículos leves: 2021-2030*. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/demanda-de-energia-dos-veiculos-leves>
- » European Environment Agency (EEA) (2016). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe*. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/climate-change-impacts-and-vulnerability-2016>
- » Gao, H., Sowlati, T., & Murphy, S. M. (2020). Impact of speed limit reduction on vehicle emission factors and road traffic emissions: Case study of a major urban road in Vancouver, Canada. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 82.
- » IEMA (2020). *Instituto de Energia e Meio Ambiente. As emissões brasileiras de gases de efeito estufa nos setores de Energia e de Processos Industriais em 2019*. https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2020/11/SEEG8_DOC_ANALITICO_SINTESE_1990-2019.pdf
- » Li, T., Song, S., & Yang, Y. (2022). Driving restrictions, traffic speeds and carbon emissions: Evidence from high-frequency data. *China Economic Review*, 74, 101811. <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2022.101811>.

Investigação dos impactos decorrentes da readequação da...

M. E. SANTOS RODRIGUES, J. IVO BRITO, B. VIEIRA BERTONCINI, J. A. HOLANDA AZEVEDO

- » Organização Mundial da Saúde (OMS) (2020). Declaração de Estocolmo. 3ª Conferência Mundial sobre Segurança Viária.
- » Organização Mundial da Saúde (OMS) (2021). *Global plan: Decade of action for road safety 2021-2030*. <https://www.who.int/teams/social-determinants-of-health/safety-and-mobility/decade-of-action-for-road-safety-2021-2030>
- » Prefeitura de Fortaleza (2021). Readequação da velocidade em corredores da Parquelândia. Fortaleza, Ceará. *Prefeitura de Fortaleza*. <https://www.fortaleza.ce.gov.br/noticias/prefeitura-de-fortaleza-readequa-velocidade-em-corredores-da-parquelandia>
- » Rodrigues, C. G., Vormittag, E. M. P. A., Cavalcante, J. A., & Saldiva, P. H. N. (2015). Projeção da mortalidade e internações hospitalares na rede pública de saúde atribuíveis à poluição atmosférica no Estado de São Paulo entre 2012 e 2030. *Revista Brasileira de Estudos de População*, 32 (3), 489–509. <https://doi.org/10.1590/S0102-3098201500000029>.
- » Roso, V. R. (2016). *Ciclos reais de condução veicular em Santa Maria e seus impactos em consumo e emissões* [Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul].
- » Sesa (2019). Secretaria da Saúde do Estado do Ceará. *Boletim Epidemiológico de Doenças Crônicas Não Transmissíveis – DCNT*. Fortaleza, Ceará. https://www.saude.ce.gov.br/wpcontent/uploads/sites/9/2018/06/boletim_epidemiologico_DCNT_22_novembro_2019.pdf
- » Smith, L. R., Cherry, C. R., & Air Quality Research Group. (2018). Effects of traffic management policies on urban vehicular emissions and air quality: The case of the London Congestion Charge and Low Emission Zone. *Atmospheric Environment*, 185, 98–109.
- » Smulders, S. (1990). Control of freeway traffic flow by variable speed signs. *Transportation Research Part B*, 24(2), 111–132.
- » Soriguera, F., Martínez, I., Sala, M., & Menéndez, M. (2017). Effects of low speed limits on freeway traffic flow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 257–274. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.01.024>.
- » Van den Hoogen, E. (1994). Control by variable speed signs: Results of the Dutch experiment. Em *Seventh International Conference on Road Traffic Monitoring and Control*, 145–149.
- » Viana, T., & Mesquita, F. (2019). Ceará tem mais de 2,7 mil mortes por doenças respiratórias em 2019. *Diário do Nordeste, Fortaleza, Metro*. <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/editorias/metro/ceara-tem-mais-de-2-7-milmortes-por-doencas-respiratorias-em-2019-1.2118450>
- » Zackor, H. (1991). Speed limitation on freeways: Traffic-responsive strategies. Em M. Papageorgiou (Ed.), *Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems*, 507–511. Pergamon Press.
- » Zhai, Z., Xu, J., Song, G., & Hatzopoulou, M. (2022). Comparative analysis of drive-cycles, speed limit violations, and emissions in two cities: Toronto and Beijing. *Science of the Total Environment*, 811.

Investigação dos impactos decorrentes da readequação da...

M. E. SANTOS RODRIGUES, J. IVO BRITO, B. VIEIRA BERTONCINI, J. A. HOLANDA AZEVEDO

Márcia Eduarda Santos Rodrigues / marcia.rodrigues@det.ufc.br

Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (2022) e mestrado em Engenharia de Transportes pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, com ênfase em Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes (2025).

Jairo Ivo Brito / jairoivo.brito@det.ufc.br

Graduado em Engenharia Civil na Unifametro, Ceará (2021), mestrado em Engenharia de Transportes pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, com ênfase em Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes (2025).

Bruno Vieira Bertoncini / bruviber@det.ufc.br

Professor Associado do Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará. Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Maringá (2005), Mestrado em Engenharia de Transportes pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (2007) e Doutorado em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (2010).

Julie Anne Holanda Azevedo/ julie@det.ufc.br

Doutora em Engenharia de Transportes pela Universidade Federal do Ceará, com ênfase em Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes. Mestra em Tecnologia e Gestão Ambiental pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE (2014). Graduada em Tecnologia em Processos Químicos pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE (2011).