

#08
CADERNO

Impactos das políticas de **REDUÇÃO DOS LIMITES DE VELOCIDADES**

do transporte motorizado na cidade de São Paulo:
Efeito nas condições de tráfego

CICLOCIDADE
ASSOCIAÇÃO DOS CICLISTAS URBANOS DE SÃO PAULO

Foto: João Souza | WPI Brasil

Impactos das políticas de redução dos limites de velocidades do transporte motorizado na cidade de São Paulo: Efeito nas condições de tráfego

CICLOCIDADE

Diretoria

Deiny Façanha - Diretora Administrativa

Ricardo Neres Machado - Diretor Geral

Yuri Vasquez - Diretor Financeiro

Equipe de projetos

Dionizio Bueno

Gabriel Bonamichi

Luciana Rocha de Souza

Ricardo Neres Machado

Comunicação

Gabriel Bonamichi

Equipe de contabilidade

Torres Contabilidade

PROJETO

Coordenação do projeto

Ricardo Neres Machado

Flávio Soares de Freitas (2024)

Pesquisa e elaboração de conteúdo

Tainá Souza Pacheco

Lucas Eduardo Araújo de Melo

Revisão de texto

Gabriel Bonamichi

Projeto gráfico e diagramação

Luciana Souza

REALIZAÇÃO

CICLOCIDADE
ASSOCIAÇÃO DOS CICLISTAS URBANOS DE SÃO PAULO

PUBLICAÇÃO

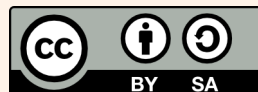
Publicação "Impactos das políticas de redução dos limites de velocidades do transporte motorizado na cidade de São Paulo: Efeito nas condições de tráfego". Outubro de 2025

COMO CITAR

CICLOCIDADE, Associação dos Ciclistas Urbanos de São Paulo. **Impactos das políticas de redução dos limites de velocidades do transporte motorizado na cidade de São Paulo: Efeito nas condições de tráfego.** São Paulo: Ciclocidade, 2025.

ISBN 978-65-985395-1-1

LICENÇA DE USO



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição-compartilhagual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Declaração: Este relatório foi produzido com a ajuda de um apoio concedido pela [The Global Road Safety Partnership \(GRSP\)](https://www.grsp.org/), um projeto hospedado pela Federação Internacional das Sociedades da Cruz Vermelha e do Crescente Vermelho (IFRC). O conteúdo deste documento é de responsabilidade exclusiva dos autores e não pode, em nenhuma circunstância, ser considerado como refletindo as posições da IFRC nem da Bloomberg Philanthropies.

APOIO



GLOBAL
ROAD SAFETY
PARTNERSHIP



Apresentação Ciclocidade

A Ciclocidade - Associação dos Ciclistas Urbanos de São Paulo é uma associação sem fins lucrativos, que tem como missão contribuir para a construção de uma cidade mais sustentável, baseada na igualdade de acesso a direitos, promovendo a mobilidade e o uso da bicicleta como instrumento de transformação.

Desde a sua fundação, em 2009, a Ciclocidade tem participado ativamente da construção de diversos planos municipais estratégicos relacionados às áreas de mobilidade sustentável, direito à cidade, segurança viária e mudanças climáticas. Dentre eles, estão: o Plano Diretor Estratégico (2014), o Plano de Mobilidade de São Paulo - PlanMob (2016), o Plano de Segurança Viária (2019), o Plano Ciclovitário de São Paulo (2020), a Agenda Municipal 2030 (2021) e o Plano de Ação Climática do Município de São Paulo - PlanClima (2021). Em parceria com a cidade de São Paulo, a associação pautou dois cronogramas de manutenção da rede cicloviária com suas Auditorias Cidadãs (2018 e 2022) e ajudou a criar um Plano de Monitoramento de Viagens em Bicicleta para a Cidade de São Paulo (2023). Em âmbito federal, auxiliou na construção das ações do Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito - PNA-TRANS (2021).

Agradecimentos

Este estudo não teria sido possível sem o acesso aos dados de fiscalização eletrônica da capital paulista, que, embora oficialmente abertos pelo CMBD – Catálogo Municipal de Bases de Dados da Prefeitura, levaram mais de três anos para serem obtidos. A Ciclocidade agradece à Secretaria de Mobilidade e Trânsito (SMT), em especial a João Cucci Neto, pela assessoria técnica, e a Marcelo Tavares Koyama, Jhonatas Leite e Thiago Araújo Costa, da Divisão Administrativa – Setor de Informática, bem como à PRODAM – Empresa de Tecnologia da Informação e Comunicação do Município de São Paulo, na figura de Markson Tarcisio de Souza, que teve papel fundamental no processo.

A Ciclocidade gostaria de agradecer às pessoas que gentilmente investiram seu tempo para ajudar a revisar a primeira versão do texto que deu origem a esta publicação: Bruno Rizzon e Paula Santos pelo WRI Brasil; Dante Rosado pela Vital Strategies Brasil; e Flávio Soares, da equipe de gabinete da vereadora Renata Falzoni. Esses esforços tornaram o conteúdo do caderno mais conciso, preciso e acessível em diversos trechos. Eventuais erros que porventura permanecerem devem ser atribuídos exclusivamente aos autores.

Índice

Apresentação Ciclocidade	3
Agradecimentos	3
Índice	4
Sumário Executivo: Resultados Principais	5
1. Introdução	7
2. Revisão de literatura	10
3. Objetivos deste estudo	14
4. Engenharia de Tráfego: conceitos e fundamentos	15
4.1 Volume de tráfego	16
4.2 Velocidade	17
4.3 Densidade	17
4.4 Relação Fundamental do Tráfego	18
5. Dados e métodos	21
5.1 Tratamento dos dados	21
5.1.1 Rotas de viagem	21
5.1.2 Radares	25
5.2 Análises Estatísticas: método diferenças-em-diferenças	27
5.2.1 Análise descritiva do banco de dados	30
6. Resultados	34
6.1 Análise dos tempos de viagem (segundos por km)	34
6.2 Análise do volume total e da velocidade média por ponto	41
6.2.2 Resultados da análise de volumes	41
6.2.3 Resultados da análise de velocidades	44
6.3 Comparação entre as alterações de velocidade por tempo de viagem e por medição pontual	46
6.4 Análise da supersaturação e homogeneização do tráfego	47
6.4.1 Definição do estado de supersaturação em cada radar	47
6.4.2 Resultados da análise de supersaturação	49
6.4.3 Resultados da análise de homogeneização do tráfego	52
7. Conclusões	55
Referências Bibliográficas	57
Apêndice	59
A1. Resultados de tempos de deslocamento para as rotas tratadas em julho de 2015	59

Sumário Executivo: Resultados Principais

Este estudo avaliou os efeitos da política de redução dos limites de velocidade máxima em mais de 600 vias da cidade de São Paulo, implementada gradualmente entre julho e dezembro de 2015. A análise utilizou os dados de equipamentos de fiscalização eletrônica de veículos (radares) entre 2015 e 2016. Obtidos por meio da Lei de Acesso à Informação, os dados permitem investigar como a mudança das velocidades máximas de circulação impactam o desempenho do tráfego motorizado individual, especialmente (i) tempo de viagem, (ii) congestionamento (supersaturação), (iii) volume de veículos, (iv) velocidades médias e (v) homogeneização dos fluxos (fator hora-pico).

O indicador de tempos de viagem se baseou nas rotas entre pares de radares, e os demais indicadores foram analisados a nível de equipamento. Os dados obtidos via LAI são disponibilizados a nível de equipamento, mas a identificação das matrículas (placas) dos veículos que passaram por cada equipamento, acompanhada do dia e hora, permite a criação de viagens entre pares de radares, e a duração de cada viagem. Os tempos de viagem foram, então, expressados em segundos por km, para facilitar a comparação entre rotas pequenas e grandes.

A metodologia utilizada comparou indicadores de desempenho viário antes e depois da implementação da política em vias/rotas tratadas e vias/rotas não tratadas (diferenças em diferenças e estudo de eventos). No grupo tratado, foram analisadas duas subamostras: as vias com redução de velocidade implementada em julho de 2015 e aquelas tratadas entre agosto e dezembro do mesmo ano.

As vias com redução de velocidade em julho de 2015 compõem cerca de 50% da amostra, e são vias de trânsito rápido, como as Marginais, enquanto as demais vias são coletoras e ou arteriais, com interrupções semaforicas e cruzamentos. A separação da análise nessas duas subamostras permite entender em que tipo de via a política gera maior impacto. Além disso, permite isolar alguns problemas de composição da amostra devido a um momento de forte expansão do número de radares na cidade no segundo semestre de 2015.

Dentre os principais resultados, é possível destacar:

- **Velocidades médias e tempos de viagem:** Em geral, observou-se uma diminuição estatisticamente significativa das velocidades em todas as faixas horárias do dia, variando entre -3,39 km/h (3h) e -0,69 km/h (14h). A faixa horária com maior impacto no tempo de viagem foi às 9h, com um aumento de 23,4 segundos/km (12,6%), equivalente a um aumento de 1 minuto e 57 segundos em uma viagem de 5 km, que durava 15 minutos e meio em média. Considerando apenas a subamostra das vias tratadas entre agosto e dezembro de 2015, o impacto observado foi ainda menor, com muitas faixas horárias não sendo estatisticamente significativas. Para essa subamostra o menor impacto no aumento do tempo de viagem foi às 6h, com uma queda de 27 segundos no tempo de viagem para um trajeto de 5 km e o de maior impacto às 8h, com um aumento de 42 segundos para um trajeto de 5 km que durava 18 minutos e meio em média.
- **Velocidades pontuais medidas no equipamento de fiscalização eletrônica:** Observou-se um maior impacto das velocidades pontuais quando comparada com as velocidades médias, particularmente na madrugada, cuja velocidade pontual média chegou a cair aproximadamente 10 km/h e, às 8h, uma diminuição de 6,1 km/h.

- **Volume de tráfego:** Não foram identificados efeitos significativos gerados pela política no volume de veículos nas vias que tiveram a velocidade alterada, indicando que, embora seja possível que motoristas tenham buscado rotas alternativas, outros assumiram esse lugar, de modo que, em termos agregados, não houve impacto no comportamento do tráfego e as vias que receberam tratamento continuam sendo atrativas aos motoristas.
- **Probabilidade de congestionamento (supersaturação):** As vias tratadas experimentam uma redução na probabilidade de congestionamento da ordem de 0,05 ponto percentual. Embora estatisticamente significativas, os resultados são muito pequenos. Isto é, a redução dos limites de velocidade não contribui, em termos absolutos, com o aumento ou redução dos congestionamentos.
- **Homogeneização do volume do trânsito dentro de cada faixa horária (fator pico-hora):** As vias tratadas experimentam um aumento no fator hora-pico de 0,01 ponto percentual, evidenciando que, em termos absolutos, não há impactos significativos na forma como o número de veículos se distribui em intervalos de 15 minutos dentro de cada hora do dia. Ou seja, ainda que exista um impacto estatístico, não há impactos reais significativos na homogeneização do trânsito.

Com base nesses resultados, é possível concluir que:

- A política de redução dos limites de velocidade **tem efeito baixo na velocidade média observada nas vias em todos os horários do dia;**
- A política de redução de velocidades afetou negativamente a velocidade pontual dos veículos próximo à localização dos radares e em magnitude muito maior que a velocidade média considerando trajetos entre radares. **Isso reforça a ideia de que os motoristas de fato reduzem a velocidade apenas imediatamente antes dos radares e depois voltam a patamares mais elevados para compensar essa diminuição pontual.** Isso indica a importância de métodos alternativos de **controle de velocidade**, como por **velocidade média;**
- A redução dos limites de velocidade apresentou um **impacto baixo no aumento dos tempos de viagem, possivelmente imperceptível para a maioria dos usuários;**
- **A redução de velocidade não diminui a atratividade das vias para os motoristas;**
- A política de redução de velocidades têm **impacto estatisticamente significativo e positivo na fluidez do trânsito** - ainda que o efeito seja de pequena magnitude. Isso indica uma leve redução na probabilidade de que as vias estejam congestionadas (supersaturadas), e diminuição da variação do fluxo de veículos dentro de cada faixa horária.

1. Introdução

A redução dos limites de velocidade em áreas urbanas é uma das políticas mais debatidas na gestão de mobilidade e segurança viária. Diferentes cidades no mundo implementaram medidas semelhantes, geralmente acompanhadas de controvérsias sobre seus efeitos na fluidez do tráfego e nos índices de acidentes. Avaliar empiricamente esse tipo de intervenção, no entanto, costuma ser um desafio, dado que em muitos contextos urbanos não há séries históricas suficientemente longas e dados suficientemente granulares sobre o comportamento do trânsito. Essa escassez de informações limita a capacidade de mensurar impactos de forma robusta e, em consequência, restringe a elaboração de políticas públicas baseadas em evidências.

Nesse sentido, a cidade de São Paulo se apresenta como um estudo de caso relevante. O município possui um histórico recente de mudanças nas velocidades máximas permitidas, alternando entre reduções e reversões, e sempre acompanhado de intenso debate público. Essas políticas afetaram algumas das vias mais importantes da cidade, como as Marginais Pinheiros e Tietê, e foram justificadas ora pelo impacto na segurança (no caso das reduções de velocidades máximas), ora pela preocupação com a fluidez do tráfego (no caso do aumento das velocidades máximas)¹.

Além disso, a cidade dispõe de registros administrativos detalhados provenientes de radares de fiscalização eletrônica, que permitem acompanhar o comportamento do tráfego ao longo do tempo. Essa combinação de relevância política e disponibilidade de dados torna o município um estudo de caso especialmente adequado para investigar os efeitos de políticas de redução de velocidades em uma grande metrópole.

O histórico de mudanças de velocidades máximas das vias tem início em meados de 2010, uma série de ruas e avenidas com grande volume de tráfego tiveram suas velocidades reduzidas². Naquele ano, enquanto as avenidas 23 de Maio e Rubem Berta passaram de 80 km/h para 70 km/h, outras passaram de 70 km/h para 60 km/h, como foi o caso das avenidas Domingos de Morais, Jabaquara, Indianópolis e a rua Sena Madureira. Já as marginais Pinheiros e Tietê reduziram os limites para os veículos pesados (ônibus e caminhões) de 90 km/h para 70 km/h.

Em 2011³, dezenas de outras ruas e avenidas também sofreram diminuição no limite de velocidades, inclusive a icônica Av. Paulista (de 70 km/h para 60 km/h). Pela primeira vez, algumas passaram a ter limites menores de 60 km/h para 50 km/h, e de 50 km/h para 40 km/h. Em 2013, a redução chegou ao centro da cidade⁴. Vias da chamada rótula central passaram a ter velocidade máxima de 40 km/h e, nos corredores de ônibus, limite de 50 km/h.

Em julho 2015, chegou a vez das marginais Pinheiros e Tietê⁵, responsáveis por 1.180 sinistros com vítimas, resultando em 1.399 pessoas feridas e 73 mortes somente em 2014. As pistas

¹ <https://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2015/07/novo-limite-de-velocidade-nas-marginais-pode-ser-revisto-diz-haddad.html>

² g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2010/09/cet-reduz-velocidade-em-mais-de-10-vias-para-diminuir-acidentes-em-sp.html

³ <https://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2011/11/cet-amplia-reducao-de-velocidade-em-vias-de-sp.html>

⁴ <https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2013/10/21/velocidade-em-14-vias-do-centro-de-sp-e-reduzida-para-40-kmh.htm>

⁵ <https://capital.sp.gov.br/w/noticia/velocidade-maxima-das-marginais-sera-reduzida-a>

expressas passaram de 90 km/h para 70 km/h para os automóveis e de 70 km/h para 60 km/h para caminhões. Já as pistas centrais tiveram o limite reduzido de 70 km/h para 60 km/h e as pistas locais de 60 km/h para 50 km/h. Ao longo do ano de 2015 outras vias arteriais e coletoras tiveram suas velocidades reduzidas, a maioria de 60km/h para 50km/h.

Todavia, em 2017, as reduções nas marginais Pinheiros e Tietê foram revertidas e voltaram às suas velocidades anteriores a 2015. Os argumentos adotados pela gestão em vigor e dos especialistas foram baseados em análises das características operacionais de tráfego e condições de geometria das vias. Juntamente com o aumento das velocidades, foram lançadas campanhas educativas, preventivas e ações de fiscalização para evitar os efeitos negativos dessa medida⁶. Ainda assim, técnicos da CET observaram um aumento no número de 6,4% no número de óbitos no ano seguinte⁷. Por fim, as políticas de redução de velocidades foram reiniciadas em meados de 2019, por meio do lançamento do Plano de Segurança Viária 2019-2028. Uma das consequências foi a redução de velocidades e criação de áreas de tráfego calmo em 24 vias no ano de 2021.

O segundo motivo pelo qual a cidade de São Paulo se apresenta como um importante estudo de caso é a existência de uma grande base de dados históricos coletados pelos radares de controle de velocidade espalhados em diversos corredores da cidade. Os dados dos radares de fiscalização eletrônica passam a existir a partir de 2015 e, de maneira mais estruturada e com boa cobertura geográfica, a partir de 2016. Assim, cobrem em parte as mudanças que aconteceram a partir de 2015 e, com mais fidelidade, as reversões de 2017 e 2019. Além de boa cobertura temporal, os dados contêm informações como a identificação dos veículos em todos os dias e faixas horárias. Assim, torna-se possível avaliar os impactos das políticas de diminuição e aumento das velocidades, considerando os efeitos de sazonalidade e permitindo o rastreamento dos tempos de viagem dos veículos e seu histórico do uso das vias da cidade.

Esses dados já foram utilizados em alguns estudos exatamente nesse contexto das políticas de diminuição das velocidades. Considerando os dados entre 2014 e 2015, Lima e Biderman (forthcoming) demonstraram que, sem considerar o efeito dos radares de velocidade, a diminuição das velocidades máximas contribuiu para uma diminuição de aproximadamente 12% nos sinistros de trânsito, mas sem impacto sobre as fatalidades. Em vias com fiscalização pré-existente às medidas, a redução dos limites levou a uma diminuição de 15% nos sinistros. Em vias com menor incidência de acidentes e sem fiscalização prévia por câmeras de velocidade, a redução de limites de velocidade não tem impacto sobre os acidentes. Em nenhuma das intervenções (redução de limite de velocidade ou câmeras de velocidade) houve impacto nas fatalidades, exceto a implementação de câmeras de velocidade em vias sem fiscalização prévia.

Ang et al. (2020) analisaram vários impactos da redução e posterior incremento de velocidades na cidade de São Paulo, incluindo sinistros de trânsito, tempos de viagem e os benefícios sociais dessas medidas. Analisando o aumento das velocidades médias que aconteceram nas Marginais no ano de 2017, os autores encontram que, em média, a cidade apresentou uma redução de 0,44% nos tempos de viagem. Ainda, um recorte das marginais Pinheiros

⁶ <https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2016/12/20/limites-de-velocidade-nas-marginais-de-sp-mudam-no-dia-25-diz-gestao-doria.htm>

⁷ https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/chamadas/marginais_tiet_e_pinheiros-acidentesfatalis2017-2018_1558556273.pdf

e Tietê demonstram que houve uma redução média de aproximadamente 6,8% no tempo das viagens feitas exclusivamente nessas vias. Dado que se constatou uma diminuição de 21,7% no número de sinistros diante das políticas de diminuição das velocidades, os resultados da análise de bem-estar indicaram que os benefícios de reduzir o número de acidentes é aproximadamente 1,32 vezes maior que os custos sociais resultantes do aumento dos tempos de viagem. Porém, esses valores são significativamente maiores para os grupos de pedestres e motociclistas de baixa renda.

O foco deste estudo, no entanto, é analisar o efeito da redução das velocidades máximas implementadas ao longo do ano de 2015 nas condições de tráfego na cidade de São Paulo. A contribuição esperada está em gerar conhecimento para as futuras políticas públicas baseadas em evidências, como também permitir que discussões possam ser estabelecidas com base nos dados observados, independentemente se eles validam ou não as medidas de diminuição de velocidades sob a ótica do tráfego.

Este estudo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta a revisão da literatura, discutindo experiências de outras cidades que reduziram ou aumentaram seus limites de velocidade. A Seção 3 define os objetivos do trabalho e a Seção 4 expõe os fundamentos teóricos que orientam a análise. Em seguida, a Seção 5 descreve os dados e a metodologia empregados. A Seção 6 apresenta e discute os resultados, e a Seção 7 traz as conclusões.

2. Revisão de literatura

Os impactos da redução de velocidades têm sido sistematicamente analisados sob diferentes perspectivas. Uma primeira linha de estudos investiga os efeitos da redução de velocidades sobre o meio ambiente, em particular nas emissões de poluentes atmosféricos e no nível de ruído do tráfego. Em sua revisão sistemática da literatura sobre o impacto da redução de velocidades quanto à emissão de poluentes, Fondzenyuy et. al (2024) revelam que existe uma mistura de resultados positivos e negativos. Os efeitos da redução de velocidades na emissão de gases de efeito estufa dependem do ambiente em que a velocidade é desenvolvida (vias urbanas ou rodovias), do tipo de controle de velocidade, da magnitude da diminuição e entre outros aspectos.

Todavia, Folgerø et al. (2020), por exemplo, não encontraram correlações estatisticamente significativas entre a redução das velocidades e menores emissões de óxidos de nitrogênio (NO₂ e NO_x) ou materiais particulados (PM_{2.5} e PM₁₀). Resultados similares foram encontrados na Nova Zelândia (Metcalf, 2023).

Também foram investigados os impactos da redução de velocidades nas vias urbanas com a poluição sonora. O ruído do tráfego é produzido basicamente por duas fontes: o motor dos veículos e o contato entre os pneus e a superfície. Archer et al. (2008) apresentam vários estudos indicando que veículos em uma velocidade de até 50 km/h emitem, em média, 5,8% menos ruído que veículos a 70 km/h e 11,1% que veículos viajando a 90 km/h. Os autores ainda ressaltam que em vias com maior declividade, essas reduções podem ser ainda mais relevantes.

Outra vertente da literatura concentra-se nos impactos sobre a segurança viária. Em muitas cidades, políticas de redução das velocidades dos veículos motorizados têm recebido tratamento prioritário devido às evidências que demonstram a correlação entre a velocidade com a qual os veículos motorizados trafegam e o risco de sinistros, a sua severidade e a probabilidade de mortes que deles resultam (OMS, 2023).

Em um estudo de caso na cidade de Daegu, Coreia do Sul, mediu-se a quantidade de sinistros de trânsito nos três anos que antecederam e sucederam as mudanças dos limites de velocidade máxima permitida implementadas em algumas vias da cidade. Enquanto a quantidade de sinistros diminuiu apenas 1,1% nas vias do grupo de tratamento, isto é, as que sofreram redução nos limites de velocidade, observou-se um aumento de 3% no número de sinistros nas vias do grupo de controle - que não sofreram mudanças na velocidade regulamentada. Em ambos os grupos, as estatísticas relacionadas ao número de fatalidades diminuíram. Enquanto o grupo de tratamento mostra uma redução de 18,4% de fatalidades a cada 100 sinistros, a diminuição de fatalidade foi menos expressiva no grupo de controle, com uma queda de 9,6% no número de fatalidades a cada 100 sinistros, mostrando a importância da redução das velocidades máximas para a redução da fatalidade dos sinistros de trânsito (World Bank, 2021).

No contexto sueco, ciclistas apresentam um risco significativo menor de se envolver em sinistros com veículos motorizados com severidade moderada ou fatal quando o limite de velocidade é de 30-40 km/h em comparação ao caso de vias com limites iguais a 50-60 km/h (Isaksson-Hellman e Toreki, 2019). Cloutier e Lachapelle (2021) revelaram uma diminuição

clara no número de mortos e feridos graves ao longo do tempo, com uma redução mais acentuada em trechos onde a velocidade inicial (> 90 km/h) e a redução foram maiores (entre 20 km/h e 40 km/h).

Além dos efeitos diretos das reduções de velocidade, estudos também discutem os diferentes mecanismos de controle e fiscalização e sua influência sobre o comportamento dos motoristas. Parcelas da sociedade advogam que campanhas de educação e conscientização no trânsito seriam suficientes para mudar o comportamento dos motoristas. Bauernschuster e Rekers (2022) analisaram o impacto das operações de monitoramento massivo de limites de velocidade, acompanhadas por campanhas midiáticas, na segurança viária. Os resultados mostram uma redução nos sinistros com vítimas em 8%, mas os efeitos desapareceram logo após a operação, indicando que, embora as campanhas levem a uma direção mais cautelosa no curto prazo, não há mudança duradoura no comportamento dos motoristas. Resultados similares foram encontrados por van Schagen et al. (2016). Eles demonstraram que os efeitos de campanhas educativas na redução de velocidades são temporários e logo desaparecem.

Até mesmo na presença de radares de fiscalização eletrônica, motoristas apresentam um comportamento de viajarem em velocidades mais elevadas. Em um estudo de caso na cidade de Curitiba (Amancio, 2021), identificou-se uma tendência dos condutores em compensar o tempo e velocidade perdidos quando da passagem devido a presença de radares, aumentando sua velocidade para um patamar superior ao praticado momentos antes de passar pelo equipamento. Resultados similares foram encontrados para a cidade de São Paulo (São Paulo, 2024). Portanto, não apenas a redução das velocidades possui um efeito positivo no risco de sinistros, mas também como elas são controladas se torna um tópico importante.

Todavia, a implementação de políticas relacionadas ao controle e redução das velocidades regulamentadas se mostra um grande peso político para os gestores por causa da opinião pública negativa dos usuários do transporte motorizado individual. Muito se argumenta que a redução das velocidades contribui com aumento dos congestionamentos e dos tempos de viagem. Embora haja poucos estudos sobre o tema, há indicativos de que o impacto gerado no tráfego é mínimo, frente ao benefício gerado por esse tipo de política. Assim, há um conjunto de pesquisas que examina os efeitos das reduções de velocidade na fluidez do tráfego e nos tempos de viagem, muitas vezes contrapondo os resultados empíricos às percepções mais comuns entre usuários e gestores.

Um estudo de caso na cidade de Fortaleza mostrou que o aumento no tempo de viagem quando da redução da velocidade máxima permitida passa de 60 km/h para 50 km/h é de aproximadamente 4,72%, o equivalente a um acréscimo de apenas 6,08 segundos por quilômetro de via percorrido (Nunes et al., 2022). Ou seja, em uma viagem de 5 km, há um aumento de aproximadamente 30 segundos no tempo do percurso. Por meio de softwares de microssimulação de tráfego, Jang et al. (2022) demonstraram que nos momentos em que o tráfego é muito leve, como no período da madrugada, o impacto da redução de velocidades nos tempos de viagem é estatisticamente significativo. Todavia, nos horários em que a via se encontra congestionada, o impacto no tempo de viagem se mostrou não significativo. Isto se dá nos casos em que a nova velocidade regulamentada continua acima da velocidade crítica do congestionamento. Ou seja, independentemente da velocidade máxima, os veículos não conseguem trafegar acima dela nos horários de congestionamento.

A literatura demonstra que a diminuição das velocidades não necessariamente leva a uma diminuição da demanda de tráfego. Soriguera et al. (2017), por exemplo, demonstraram que mesmo mantendo a velocidade máxima da via em 40 km/h, um fluxo de veículos de aproximadamente 1.942 veículos por hora por faixa pode ser alcançado, revelando-se um valor muito próximo do fluxo quando a velocidade é igual a 80 km/h (1.972 veículos/h/faixa) e 60 km/h (1.956 veic/h/faixa). Isso é possível devido à capacidade dos motoristas em dirigir em distâncias menores uns dos outros, aumentando a densidade de veículos. Ou seja, a mesma quantidade de veículos passa por um ponto da via considerando velocidades diferentes.

Em relação ao tempo de viagem, a revisão bibliográfica conduzida por Yannis e Michelaraki (2024) apresenta estudos sobre o impacto da criação de zonas 30, regiões onde a velocidade máxima permitida é de 30 km/h, no tráfego da cidade. No caso de Bruxelas, Bélgica, não foram constatados aumentos nos tempos de viagem causados pela implementação dessas áreas em 80 localidades da cidade. Em Bilbao, Espanha, uma pesquisa feita com usuários mais contrários à implementação de programas de redução de velocidades como entregadores, taxistas e motoristas em geral, admitiram estar satisfeitos com os efeitos dessas medidas, além de reconhecerem que não houve impactos significativos nos seus deslocamentos. Neste mesmo período, estudos indicaram uma queda de 2% nos congestionamentos da cidade. Em Zurique, Suíça, os efeitos da redução de velocidades em várias vias para 30km/h apresentaram um aumento entre 10 e 30 segundos por quilômetro de deslocamento. Todavia, em horários de pico, essa diferença se aproximou de zero. Ou seja, há indícios que essas medidas possuem pouco, ou quase nenhum, efeito nos tempos de viagem.

Embora seja complexo de se calcular, Acher et al. (2008) discutem estudos que demonstram o impacto da redução de velocidades no aumento do tempo de viagem. A Tabela 1 mostra o aumento do tempo de viagem em percursos de 10 km a partir da redução de 5 km/h em diferentes faixas de velocidade. O impacto das reduções de velocidade nos tempos de viagem são maiores quando se diminuem velocidades consideradas já baixas, como de 35 km/h para 30 km/h ou de 45 km/h para 40 km/h. Ao reduzir a velocidade máxima permitida em vias com velocidades elevadas, como 60 km/h, 70 km/h e 80 km/h, o aumento no tempo de viagem é menor que 1 minuto.

Isso se deve ao fato de que vias com velocidades máximas maiores tendem a receber fluxos maiores também. Assim, a velocidade praticada pelos veículos já é bastante inferior à máxima regulamentada. Em casos de vias com velocidade máxima baixa e pouco fluxo de veículos, a redução é de fato percebida pelos motoristas. É importante destacar que isso é verdade para vias de fluxo livre. Ou seja, mesmo sem interrupção no tráfego, os efeitos ainda são pequenos. A expectativa é que quando esses cálculos são traduzidos para o ambiente urbano, onde há várias interrupções e incertezas, a tendência é que esses efeitos sejam ainda menores, ou nulos.

Tabela 1: Tempo extra de viagem em deslocamentos de 10 km para diminuições de 5 km/h na velocidade média

Velocidade (km/h)	Antes	35	45	55	65	75	85
	Depois	30	40	50	60	70	80
Aumento Tempo de Viagem (mm:ss)		2:51	1:40	1:05	0:46	0:34	0:26
Fonte: Acher et. al. (2008)							

Em um relatório sobre o impacto das zonas 30 em cidades inglesas, Atkins et. al. (2018) demonstraram que houve um aumento de 3% a 5% nos tempos de viagem para deslocamentos entre 3 km e 8 km, respectivamente, das rotas que passam por meio de zonas 30 (20 milhas por hora) em relação à rotas semelhantes que não passam por essas áreas e que continuaram com velocidades de aproximadamente 50 km/h (30 milhas por hora).

Juntamente com os outros resultados apresentados, é possível observar que os aumentos nos tempos de viagem são bem menores do que o senso comum intuitivamente assume quando se trata da questão da diminuição das velocidades máximas permitidas. Isso também é verdade quando se trata do aumento da saturação das vias, visto que as velocidades desenvolvidas pelos veículos nos horários de pico são significativamente menores que as velocidades máximas já existentes.

Em síntese, a literatura aponta que os efeitos da redução de velocidades variam de acordo com o contexto urbano, o desenho das políticas e a forma de fiscalização. Enquanto há evidências consistentes de benefícios em termos de segurança viária, os resultados sobre emissões, ruído e tempos de viagem são mais heterogêneos e, em alguns casos, pouco expressivos. Além disso, muitos estudos enfrentam limitações relacionadas à disponibilidade de dados detalhados sobre tráfego e à dificuldade de acompanhar os impactos ao longo do tempo. Esse quadro reforça a importância de investigações em grandes centros urbanos que disponham de bases de dados abrangentes e de alta granularidade. Nesse sentido, São Paulo oferece uma oportunidade ímpar, pois reúne tanto um histórico de políticas de redução e reversão de velocidades quanto registros administrativos capazes de mensurar seus impactos de forma mais precisa.

3. Objetivos do estudo

Diante desse contexto e do levantamento bibliográfico apresentado, foram definidas quatro perguntas de pesquisa que auxiliaram a definição dos objetivos deste estudo.

- A.** A redução das velocidades máximas permitidas afeta os tempos de deslocamento dos usuários?
- B.** A redução das velocidades máximas permitidas afeta a incidência de congestionamento (supersaturação do tráfego)?
- C.** Há alguma relação entre as reduções observadas e o mecanismo de homogeneização do trânsito?
- D.** Diante dos dados disponíveis, é possível avaliar se a redução das velocidades máximas permitidas mudou o comportamento dos usuários? Ou seja, os usuários continuam utilizando as mesmas rotas entre as suas origens e destinos mais comuns?

Essas perguntas focam nos principais aspectos da engenharia de tráfego e que são facilmente percebidas pelos usuários como o tempo de viagem, incidência de congestionamentos e na busca por rotas alternativas. Desta maneira, o objetivo deste estudo é avaliar o impacto das políticas de redução de velocidades máximas no desempenho do tráfego e no comportamento dos usuários do transporte motorizado individual. A fim de atingir este objetivo, são definidos os objetivos específicos.

- I.** Conduzir análise comparativa dos tempos de deslocamento dos veículos entre pares de radares eletrônicos em rotas que tiveram a velocidade alterada com rotas que não tiveram a velocidade alterada nos períodos anterior e posterior à implementação das políticas de redução de velocidades;
- II.** Conduzir análise comparativa da distribuição do volume de veículos dentro de cada hora do dia em radares em vias que tiveram e que não tiveram a velocidade alterada nos períodos anterior e posterior à implementação das políticas de redução de velocidades;
- III.** Conduzir análise comparativa dos níveis de congestionamento em radares em vias que tiveram e que não tiveram a velocidade alterada nos períodos anterior e posterior à implementação das políticas de redução de velocidades;
- IV.** Avaliar as velocidades pontuais dos veículos que passam nos radares ao longo do tempo, em radares em vias que tiveram e que não tiveram a velocidade alterada.

Este estudo se destaca pelo tamanho do repositório de dados da série histórica dos registros dos radares de controle de velocidade instalados no município de São Paulo, chegando a milhões de registros por dia entre os anos de 2015 e 2016. Os dados utilizados para o desenvolvimento deste estudo foram obtidos por meio da Lei de Acesso à Informação (LAI)⁸ e foram estruturados por estudos anteriores conduzidos pela Ciclocidade.

8 LAI: Lei de Acesso à Informação LEI Nº 12.527, DE 18 DE NOVEMBRO DE 2011. Os dados utilizados neste estudo foram recebidos via LAI: nº 85588 de 03/12/2024, nº 72853 de 12/04/2023 e nº 65772 de 20/05/2022.

4. Engenharia de Tráfego: conceitos e fundamentos

Para alcançar os objetivos desta pesquisa, é preciso definir primeiramente termos como velocidade, congestionamento, volumes e capacidade de maneira clara e precisa. Essa seção tem como objetivo apresentar noções teóricas e conceitos utilizados pela Engenharia de Tráfego, que é o campo de estudo em que repousa o problema de pesquisa. A bibliografia básica é dada por Roess et al. (2011).

Dado que este estudo será aplicado ao caso da cidade de São Paulo, além da literatura técnica/acadêmica, serão utilizados como apoio os cadernos técnicos da CET a fim de unificar a nomenclatura utilizada na teoria e prática da engenharia de tráfego. Além disso, este capítulo também apresenta resultados de estudos empíricos sobre o tema com o objetivo de analisar as melhores práticas e técnicas para avaliar as perguntas de pesquisa levantadas neste estudo.

Lidar com o tráfego envolve trabalhar com a variabilidade. Veículos e condutores se comportam de maneira diferente conforme as condições climáticas, as características físicas e limitações operacionais das vias. Embora o desafio seja avaliar e planejar com base em números médios, dados empíricos mostram que as variáveis normalmente utilizadas nesses tipos de estudo se localizam dentro de um intervalo de valores em que podem ser trabalhados de maneira a se chegar em conclusões razoáveis.

O estudo do tráfego pode ser dividido em duas categorias, com base nos tipos de vias. A primeira categoria considera o tráfego em fluxo ininterrupto, em que não existem interseções em nível, rotatórias, sinalização semafórica ou de pare. Neste caso, as características do tráfego se baseiam apenas na interação entre veículos, ou entre os motoristas, as vias e o ambiente construído. A segunda categoria é justamente aquela que considera o tráfego em fluxo interrompido, em que todas essas influências externas podem estar presentes para atuar no comportamento do motorista.

No passado, uma das principais preocupações da engenharia de tráfego era responder qual a capacidade necessária das vias a fim de atender a demanda de tráfego. Nesse sentido, a capacidade de uma via é medida pela sua possibilidade de acomodação do volume de tráfego, conforme as suas características físicas (CET, 1977). Embora a preocupação atual dos engenheiros de transportes vá além da expansão da oferta ou da capacidade das vias, este conceito ainda possui grande relevância nos estudos de tráfego. A capacidade da via é influenciada por três conceitos principais: volume de tráfego, velocidade e densidade. Combinados, esses três parâmetros definem a relação fundamental do tráfego, conforme as subseções a seguir.

4.1 Volume de tráfego

O volume de tráfego é definido como o número de veículos que passa por uma determinada seção de uma via, por direção e/ou faixa, em um determinado intervalo de tempo (veículos/hora, veículos/dia). Outro termo importante é o fluxo de tráfego, expresso em veículos por hora. Porém, este representa volumes de veículos que passaram em uma seção em intervalos menores que 1h. Por exemplo, 200 veículos passaram em uma seção em apenas 15 minutos. Isso representaria uma taxa de fluxo de 800 veículos por hora ($200 \cdot 60/15$).

Outro tipo de volume importante é o volume horário, em que se calcula a quantidade de veículos que passam em uma seção transversal de uma via num período de uma hora. Ao longo de um mesmo dia, o volume horário de veículos varia bastante. Porém, o mais importante é o horário de pico, que se trata do período de uma hora com maior volume de tráfego ao longo do dia. Mesmo dentro dessa hora-pico, o comportamento do volume não é homogêneo, de modo que, para fins de dimensionamento das vias, é utilizado o fator de pico-horário (FPH) (Equação 1).

$$FPH = \frac{V_{hp}}{4 * V_{15}} \quad (1)$$

Em que:

FPH - Fator Pico-Horário;

V_{hp} - Volume da Hora-Pico;

V₁₅ - Volume dos 15 minutos consecutivos de maior tráfego dentro da Hora-Pico.

O FPH pode oscilar entre 0,25 e 1,00, mas em geral é da ordem de 0,85. É muito utilizado para dimensionamento de interseções semaforizadas. Já para estudos de capacidade em vias expressas (tráfego ininterrupto), utiliza-se fórmula semelhante (Equação 2).

$$FPH = \frac{V_{hp}}{12 * V_5} \quad (2)$$

Em que:

FPH - Fator Pico-Horário;

V_{hp} - Volume da Hora-Pico;

V₅ - Volume dos 5 minutos consecutivos de maior tráfego dentro da Hora-Pico.

Conhecendo-se todos os volumes horários no ciclo de um ano pode-se desenhá-los em ordem decrescente em um gráfico. A forma desta curva se mantém constante para quase a totalidade das rodovias. Ela apresenta um ponto importante e que varia muito pouco de uma cidade para outra: o ponto de máxima curvatura situa-se quase sempre por volta da trigésima hora. Antes deste ponto, os volumes crescem muito rapidamente, enquanto à sua direita, decrescem de maneira moderada, inicialmente, para lenta, depois. Assim, as vias são normalmente dimensionadas prevendo um congestionamento anual de 30 horas. Ou seja, se uma via é dimensionada para receber 1.800 veículos na hora-pico, espera-se que em apenas 30 horas ao longo de um ano esse volume ultrapasse os 1.800 veículos.

4.2 Velocidade

Uma das variáveis mais relevantes para os motoristas escolherem a rota entre a sua origem e destino é o tempo de viagem. Apesar dos impactos negativos relacionados ao aumento indiscriminado das velocidades dos veículos motorizados, esta é uma variável intrínseca do transporte (van Goeverden, 2022).

Na engenharia de transportes, há diferentes definições de velocidade utilizadas para diferentes propósitos. A velocidade de projeto é a velocidade selecionada pelo projeto geométrico da via e que condicionará as suas características de operação. A velocidade de percurso é dada pela razão entre a distância percorrida e o tempo de viagem. A velocidade de percurso pode ser influenciada por diferentes fatores como o comportamento dos motoristas, o veículo, as características da via, clima, regulamentação, número de faixas e o tráfego. Dessa maneira, a velocidade de percurso nem sempre é igual à velocidade de projeto, de modo que a velocidade de percurso em certas condições é também chamada de velocidade de operação.

Dois tipos de velocidades são particularmente importantes na engenharia de tráfego. A velocidade média no tempo é dada pela velocidade média dos veículos que passam em um ponto de uma via em um intervalo de tempo. Ou seja, basta aferir a velocidade instantânea de cada veículo e calcular sua média aritmética. Já a velocidade média no espaço é calculada como a velocidade média dos veículos ocupando uma certa seção da via em um intervalo de tempo. Nesse caso, afere-se o tempo de viagem de cada veículo para percorrer a seção escolhida e calcula-se o tempo médio de viagem. A velocidade média no espaço é dada, então, pela razão entre o comprimento da seção e o tempo médio de viagem dos veículos.

4.3 Densidade

Das três principais variáveis da Engenharia de Tráfego, isto é, velocidade, volume e densidade, a última é a medida que mais se aproxima da demanda de tráfego. É definida como a quantidade de veículos que ocupam um certo comprimento da via (veículos/km). Entretanto, é a mais difícil de ser calculada diretamente.

A densidade se traduz na quantidade de veículos utilizando o mesmo trecho da via simultaneamente. Quanto maior o número de veículos em um dado comprimento, menor a distância entre veículos. Isso faz com que se diminua a liberdade de manobra e influencie os motoristas de modo que, por questões de segurança, os motoristas tendem a diminuir a sua velocidade para evitar colisões.

4.4 Relação Fundamental do Tráfego

A densidade (veículos/km) e a velocidade (km/h) combinadas resultam no volume ou na taxa de fluxo de tráfego (veículos/h) (Equação 3). Esta combinação é conhecida como a relação fundamental do tráfego (Greenshields, B.D., 1935).

$$v = s * D \quad (3)$$

Em que:

- v - volume ou taxa de fluxo de tráfego (veículo/h);
- s - velocidade média no espaço (km/h);
- D - densidade (veículos/km).

A Figura 1 apresenta os diagramas que podem ser gerados entre as variáveis quando mantida uma delas constante. Essas curvas podem ser plotadas a partir da observação ou coleta de dados empíricos. É importante destacar que um mesmo local de medição pode apresentar variações no formato e magnitude das curvas de acordo com as condições presentes.

Conforme pode ser observado no diagrama à direita da Figura 1, o fluxo de tráfego igual a zero (0 veículos/h) acontece sob duas condições. A primeira ocorre quando a densidade também é igual a zero. Ou seja, quando não há veículos na via. Sob esta condição, não é possível medir a velocidade (ver o gráfico da relação entre densidade e velocidade) e é chamada de velocidade em fluxo livre. Em termos práticos, essa velocidade é dada pela velocidade em que um único veículo consegue alcançar quando da ausência de outros veículos na via e cujo motorista consegue dirigir o mais rápido possível dada a geometria da via e do ambiente construído ao redor.

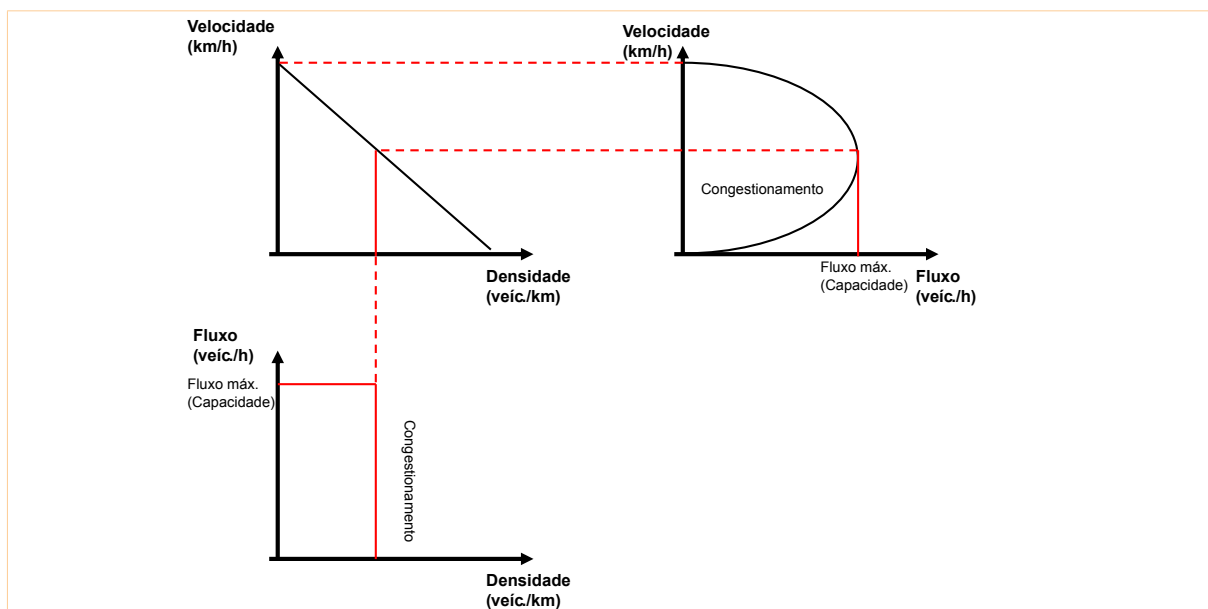


Figura 1: Diagramas da relação fundamental do tráfego
Fonte: Traduzido de Roess et al. (2011)

A segunda condição em que o fluxo de tráfego também é igual a zero (diagrama à direita da Figura 1) pode ser observada quando há uma quantidade tão grande de veículos em um trecho da via (alta densidade) que não há mais espaço para manobra e os motoristas se sentem inseguros para desenvolver uma velocidade, de modo que todo o movimento cessa. Ou seja, com velocidade igual a zero (diagrama à esquerda superior da Figura 1), não há fluxo de veículos porque todos os veículos estão parados.

Entre essas duas condições existe uma característica de pico, tanto na curva de fluxo de tráfego versus densidade quanto na curva do fluxo de tráfego versus velocidade. O pico de máximo fluxo de tráfego é o que caracteriza a capacidade da via. Isto é, a quantidade máxima de veículos que passam por uma determinada seção da via em um intervalo de tempo. A operação de uma via na sua capacidade é considerada instável, pois qualquer perturbação, mínima que seja, como pequenas colisões, obstáculos na via, lâmina d'água um pouco acima do normal, já é suficiente para que as condições de tráfego (densidade, velocidade e fluxo) se deterioremem.

O ponto de capacidade divide, portanto, a operação de uma via em duas condições. A primeira, em que o fluxo de tráfego é menor que o da capacidade, a via opera em condições de estabilidade com velocidades elevadas e baixas densidades. É o que se normalmente observa nos horários fora de pico. A segunda condição da Figura 1 é conhecida como condições grandemente instáveis, ou supersaturadas. Essa situação é conhecida como a de congestionamento (supersaturação), em que as velocidades e densidades estão acima das velocidades e densidades críticas. Ou seja, a performance do tráfego é prejudicada devido à alta demanda (fluxo de tráfego) de veículos na via.

A partir de derivações matemáticas da relação fundamental do tráfego, tem-se que a velocidade para qual o fluxo é máximo, ou para qual atinge-se a capacidade da via, é dada pela metade da velocidade máxima da via.

As curvas apresentadas na Figura 1 podem ser definidas empiricamente a partir da medição de duas das três variáveis em qualquer seção de uma via. A relação entre os seus valores podem ser encontradas a partir da introdução de coeficientes, que fazem com que a curva da relação matemática se ajuste aos dados observados. A Figura 2 e a Figura 3, por exemplo, advêm de um equipamento eletrônico de contagem do banco de dados utilizado neste estudo. A vantagem desses equipamentos é a coleta quase ininterrupta de dados ao longo do ano, sendo possível observar mudanças no formato da curva diante das sazonalidades anuais, mensais e semanais.

A partir da relação fundamental, é possível verificar que nem sempre a redução de velocidade resulta em uma queda no fluxo de veículos. O aumento do fluxo com a redução de velocidade pode ocorrer porque, ao reduzir a velocidade, a densidade de veículos aumenta e, em velocidades moderadas, o fluxo de veículos é maximizado. A redução de velocidade gera a homogeneização do tráfego, permitindo que mais veículos passem pela via no mesmo intervalo de tempo, o que aumenta o volume total de tráfego em condições de alta densidade (Soriguera et al., 2017).

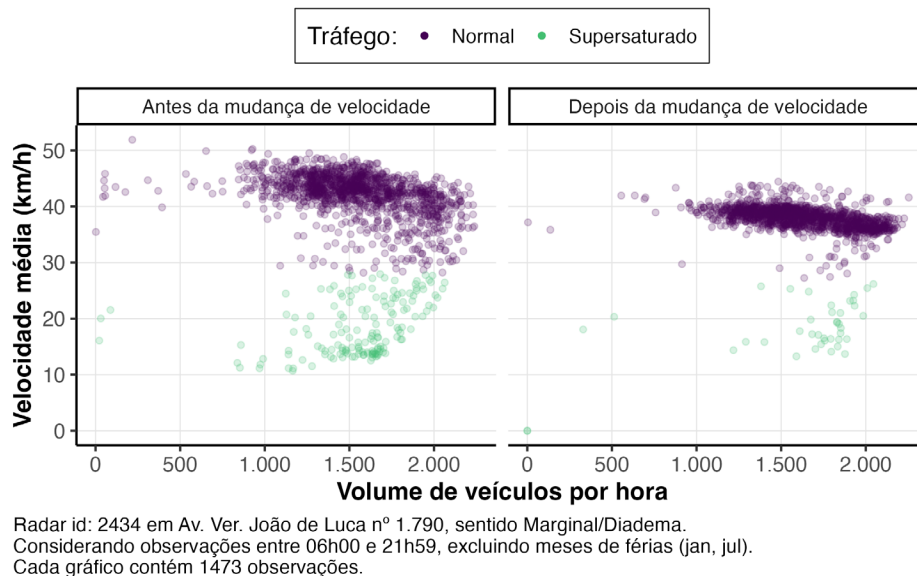


Figura 2: Relação fundamental do tráfego a partir de dados empíricos - velocidade versus volume.
Fonte: Elaboração dos autores.

Notas: essa figura apresenta o volume total e a velocidade média por hora em um radar específico do banco de dados. Como esse radar está em uma via que teve a velocidade alterada, existem dois gráficos: um para antes e outro para depois da mudança de velocidade. Cada ponto é uma hora em um dia.

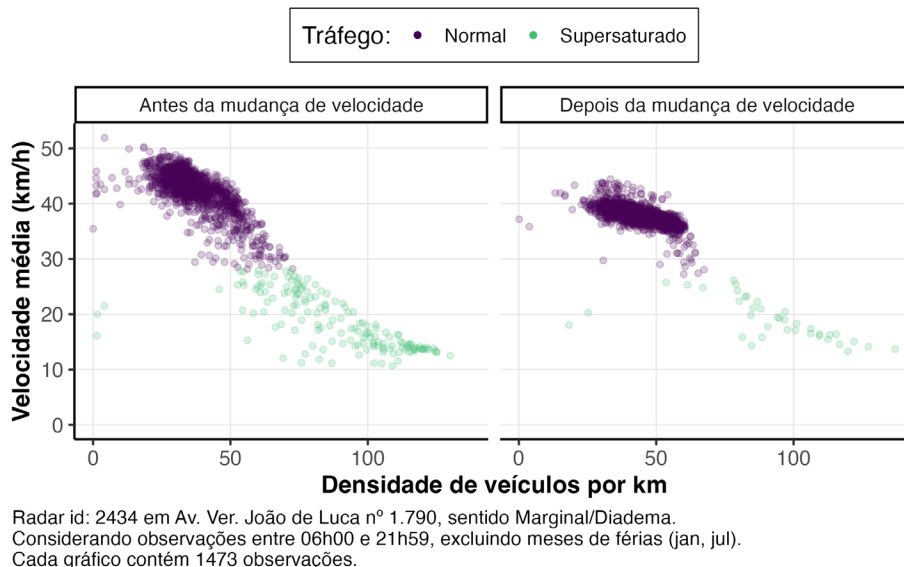


Figura 3: Relação fundamental do tráfego a partir de dados empíricos - velocidade versus densidade.
Fonte: Elaboração dos autores.

Notas: essa figura apresenta a densidade de veículos e a velocidade média por hora em um radar específico do banco de dados. Como esse radar está em uma via que teve a velocidade alterada, existem dois gráficos: um para antes e outro para depois da mudança de velocidade. Cada ponto é uma hora em um dia.

Na Figura 2 à esquerda é possível observar que o fluxo de veículos médio para uma velocidade de 50 km/h (aproximadamente 1.000 veic./h) é menor que o fluxo de veículos médio para uma velocidade de 40 km/h (entre 1.500 e 2.000 veic./h). Isso é particularmente importante para vias urbanas já supersaturadas. Em vias cuja demanda já está perto do ponto de capacidade máxima, uma redução da velocidade máxima pode não resultar em mudanças no tempo de viagem porque os veículos já estavam trafegando a uma velocidade bastante inferior à máxima.

Dados e métodos

O método adotado para avaliação dos objetivos propostos está dividido em duas etapas. Por se tratar de uma grande base de dados, o primeiro passo se concentra no tratamento, delimitação e filtragem dos dados. Essa etapa é fundamental não apenas para transformar os dados brutos em informação a partir da retirada dos ruídos, mas também devido ao método estatístico escolhido para avaliação das hipóteses do estudo.

O método estatístico adotado (*diferenças-em-diferenças*), apresentado em detalhes na Seção 5.2, requer a classificação dos dados em grupos de tratamento, ou seja, as rotas e radares em vias que sofreram de alguma forma reduções de velocidades máximas regulamentadas, e em grupos de controle, composto por rotas e radares em vias sem nenhum tipo de alteração nas velocidades máximas regulamentadas ao longo do período de análise. Assim, a etapa de preparação dos dados usados na análise se preocupou em classificar os dados nesses dois grupos: tratados e controle.

5.1 Tratamento dos dados

5.1.1 Rotas de viagem

A Figura 4 resume os passos de tratamento do banco de dados que serão explicados em detalhe ao longo desta seção.

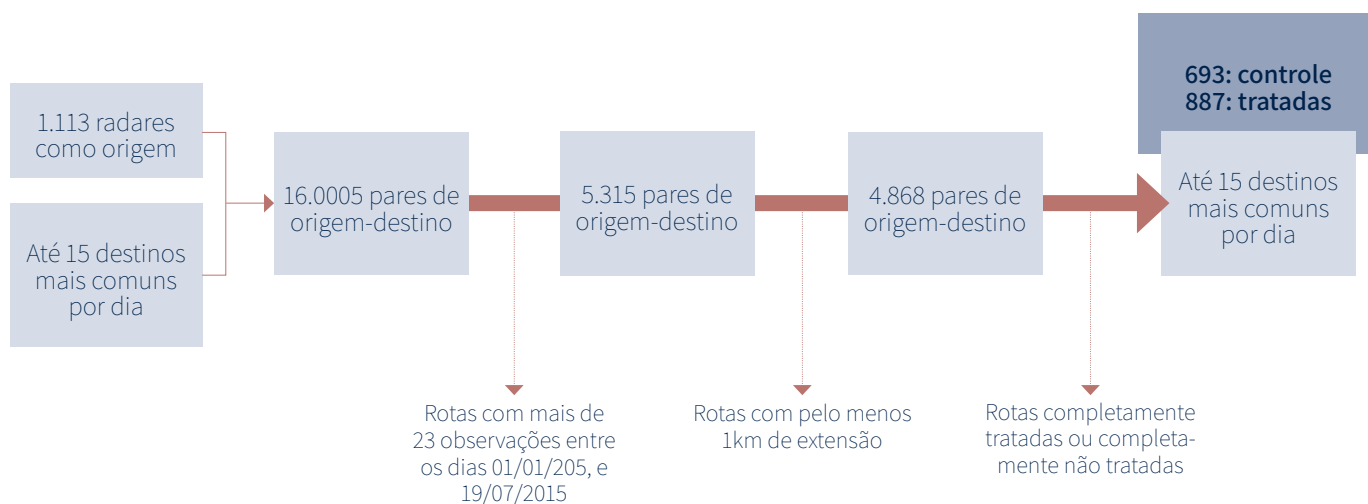


Figura 4: Construção do banco de dados - tempos de viagem

Fonte: elaboração dos autores.

A partir da base de dados dos radares instalados em São Paulo entre 2015 e 2022, foram identificados 1.113 dispositivos e criadas matrizes diárias de origem-destino entre eles, considerando finais de semana e feriados. Essas matrizes foram geradas a partir da identificação das placas e horários de registro, adotando como destino sempre o radar com horário posterior para uma mesma placa. Para reduzir o tamanho da base, foram selecionados os 15 destinos mais frequentes de cada radar de origem, o que levou à obtenção de 16.005 pares mais comuns. Alguns radares apresentaram menos de 15 conexões, como no caso dos radares móveis.

É importante destacar que os radares não estão ativos o tempo inteiro. Os dispositivos se encontram desligados por problemas técnicos, vandalismo ou manutenção preventiva - seja do próprio equipamento ou da via em que o equipamento está instalado. Nesse sentido, calculou-se a média do número de veículos entre cada par de radares por dia entre 01/01/2015 e 31/12/2022, considerando a razão entre o volume total de registros entre cada par de radares e a quantidade de dias em que ambos os radares de origem e destino estavam ativos.

A distribuição do número médio de veículos em cada par é bastante assimétrica (Tabela 2), com observações concentradas em valores mais baixos, e algumas observações com valores extremamente altos. Isso reflete a dinâmica da rede de vias de São Paulo, com vias de alta intensidade, como as Marginais Pinheiros e Tietê, e vias coletoras de uma ou duas faixas. De fato, o par com o maior fluxo observado de veículos é de dois radares na Marginal Tietê, pista expressa, sentido Castelo Branco para Ayrton Senna (ID 6753 para ID 6742), com um valor médio de 70.818 veículos por dia. Além disso, é possível identificar o primeiro e último dia em que cada veículo foi identificado em cada par OD. As datas variam porque dependem de quando cada radar foi instalado e/ou desativado. Entre 2015 e 2016, foram observadas poucas desativações, porém muitas instalações novas.

Tabela 2: Distribuição do número médio de veículos por rota.

	Mín	Percentil 25%	Mediana	Média	Percentil 75%	Máx
Número médio diário de veículos entre pares de radares	1,52	82,66	192,90	863,27	512,48	70.818,53
Fonte: elaboração dos autores						

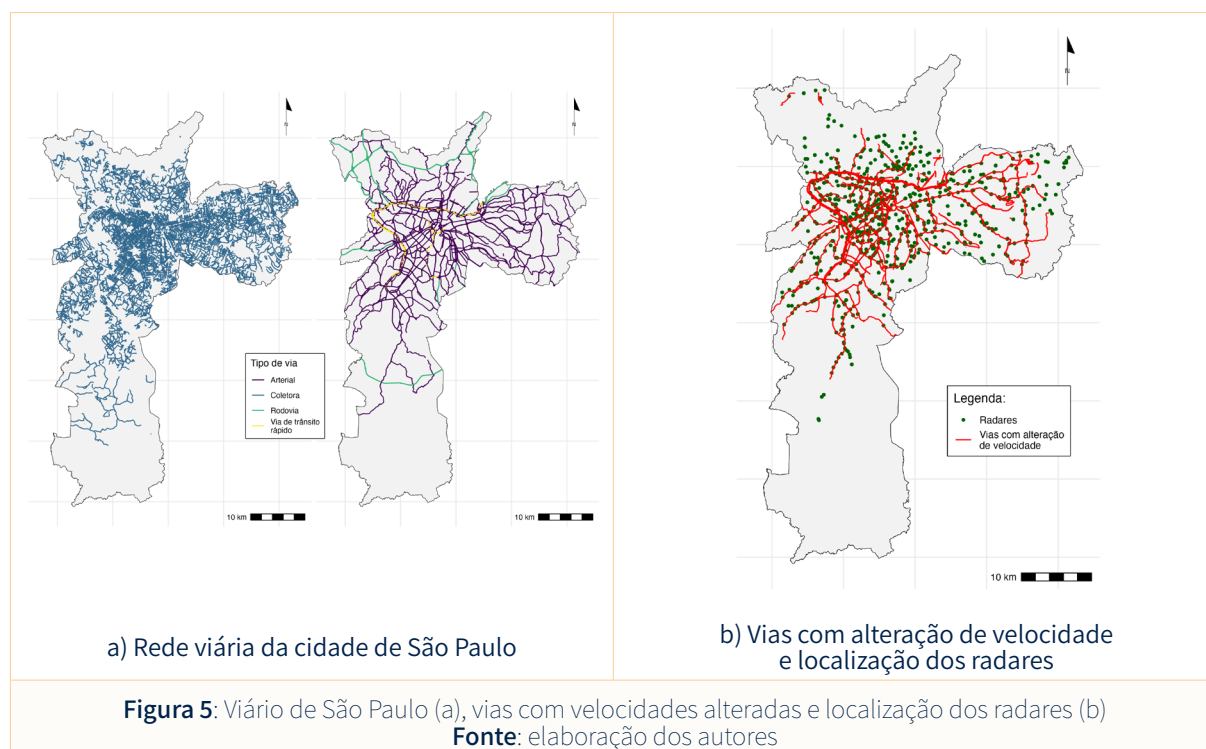
Após definir os pontos de origem e destino das viagens, foi necessário criar as rotas entre os pares de radares a fim de se medir a distância percorrida no viário entre cada par de radar e, consequentemente, a velocidade média dos veículos.

Para isso, cada radar foi atribuído a um arco da rede viária conforme a classificação viária da CET disponível no portal GeoSampa (Figura 4a). Todos os radares estão em vias (i) arteriais, (ii) coletoras, (iii) rodovias ou (iv) vias de trânsito rápido, com exceção de um radar localizado na Rua Antônio José Anacleto, que é uma via local. As rotas entre os pares de radares foram criadas utilizando a rede viária disponível no OpenStreetMap (OSM), considerando o caminho mais rápido entre eles de acordo com o viário e as velocidades máximas de janeiro de 2015⁹.

Dado que o objetivo principal deste estudo é avaliar o impacto da redução de velocidades máximas regulamentadas no comportamento do tráfego, é de fundamental importância entender se as rotas entre os pares de radares sofreram mudanças na regulamentação das velocidades máximas. Para isso, foram incorporados dados fornecidos pela Iniciativa Bloomberg para a Segurança Viária Global (BIGRS) sobre as vias que tiveram velocidades máximas regulamentadas reduzidas entre 09/05/2000 e 30/12/2015 (Figura 5b). Todavia, os dados da

⁹ O portal Geofabrik disponibiliza conjuntos de dados do OSM para datas passadas (<https://download.geofabrik.de/south-america/brazil.html#>)

Iniciativa Bloomberg para a Segurança Viária Global (BIGRS) são compatíveis apenas com os dados da CET, sendo necessário gerar a equivalência de rotas geradas no OSM no sistema viário da CET. Com isso, foi possível identificar o percentual da rota entre cada par de radar que passou pelo tratamento de diminuição de velocidades ao longo do tempo.



Dado que a análise avalia o comportamento do tráfego em um período anterior e posterior às mudanças, não basta que a rota tenha sido identificada entre janeiro e dezembro de 2015 - é essencial que haja um número mínimo de registros no momento anterior à mudança de velocidade. Como a maior parte das vias sofreram alteração de velocidade em 20/07/2015, foram selecionadas apenas as rotas com pelo menos 23 registros entre 01/01/2015 e 19/07/2015. Esse intervalo compreende 142 dias, então o critério adotado foi excluir o primeiro quartil das rotas com menos observações e manter apenas os 75% com maior volume de dados (Tabela 3)¹⁰. Com esse filtro, o conjunto final inclui 610 radares como origem, 594 como destino e um total de 5.315 rotas.

Tabela 3: Distribuição do número de vezes que a rota aparece antes de julho de 2015.

	Mín	Percentil 25%	Mediana	Média	Percentil 75%	Máx
Número de vezes que a rota aparece entre 01/01 e 19/07/2015	1	23	61	64,7	103	142

Fonte: elaboração dos autores

¹⁰ A escolha de retirar o quartil inferior de rotas é arbitrária. Ao escolher manter 75% das observações buscou-se balancear rotas que aparecem com frequência no banco de dados sem reduzir demais os dados disponíveis para análise. Futuros trabalhos poderiam explorar se considerar um corte mais alto, excluindo por exemplo 50% das rotas, alteraria o resultado.

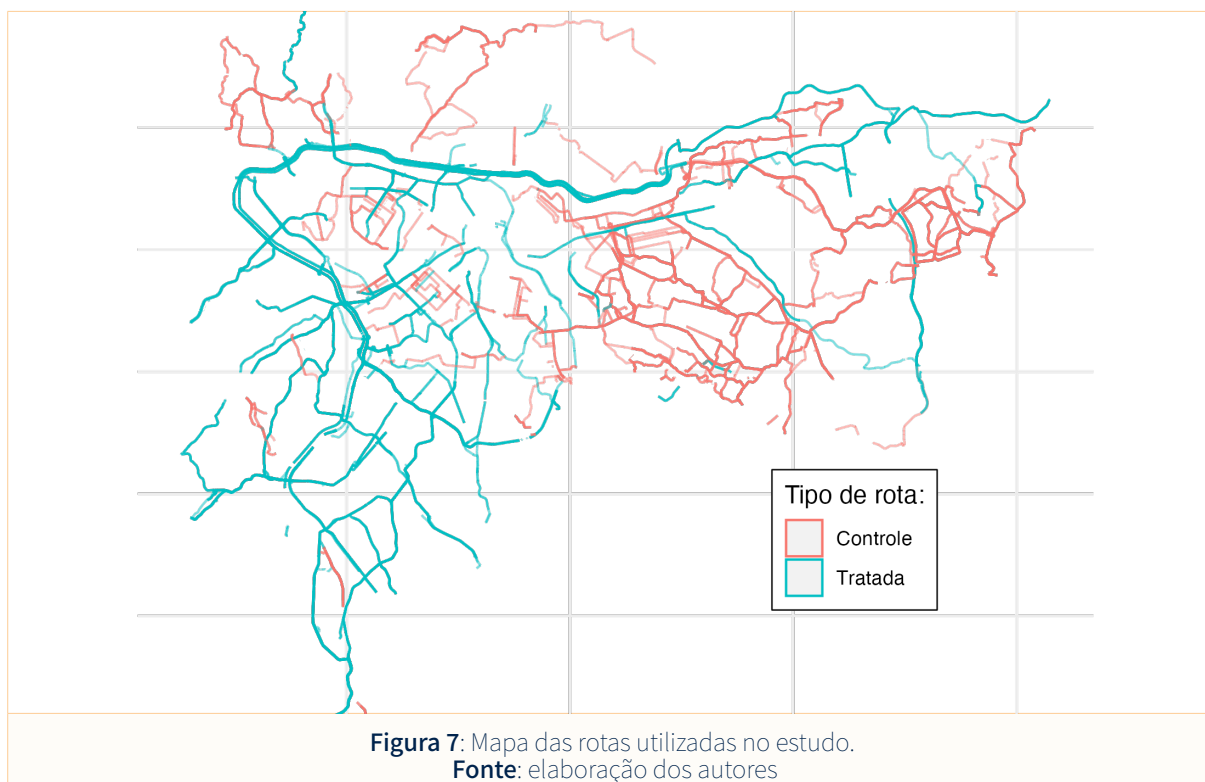
O terceiro passo do processo de tratamento de dados é avaliar a consistência das rotas e, posteriormente, classificá-las entre rotas que sofreram a intervenção de diminuição da velocidade máxima regulamentada (grupo de tratamento) e as que não sofreram essa intervenção ao longo do tempo (grupo de controle). Foram excluídas, então, rotas iguais ou menores que 1 km. Muitas vezes, essas rotas são fruto de erros nas alocações de tráfego no viário feito pelo OSM, conforme validação em uma amostra aleatória dos dados. Como resultado, foram excluídas 447 rotas, restando um total de 4.868 rotas no banco de dados.

O próximo passo foi atribuir um indicador de tratamento a cada segmento viário que compõe cada uma das rotas. Se o segmento teve sua velocidade alterada em algum momento, ele recebe status “tratado”. Se o segmento não teve sua velocidade alterada, ele recebe o status “controle”. Assim, cada rota tem uma proporção da sua distância tratada. A distribuição das proporções das rotas que foram tratadas (porcentagem igual a 100) ou não (quando for 0%) é apresentada na Figura 6.



Nesse sentido, é possível observar que a maior parte das rotas foram classificadas como totalmente tratadas (100%) ou não sofreram nenhum tipo de tratamento (0%, controle). A fim de simplificar as análises posteriores, foram mantidas no banco de dados apenas essas rotas.

O banco de dados final é composto, portanto, de 1.580 rotas, sendo 693 rotas no grupo de controle e 887 no grupo de tratamento. A Figura 7 apresenta o mapa das rotas presentes no banco de dados final. Por fim, o recorte temporal analisado neste trabalho considera apenas o período entre janeiro/2015 e dezembro/2016, sendo possível apenas a análise dos efeitos da política de redução de velocidades máximas adotada ao longo de 2015.



5.1.2 Radares

A Figura 8 resume os passos de tratamento do banco de dados, que serão explicados em detalhe ao longo desta seção.

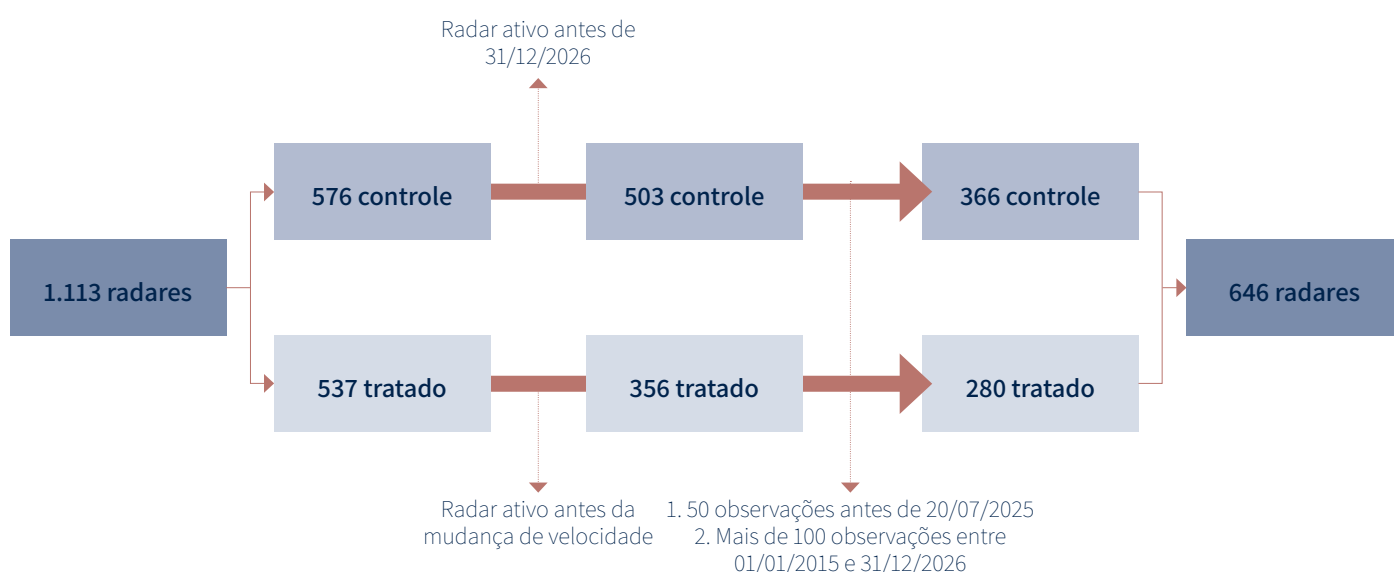


Figura 8: Construção do banco de dados - radares.
Fonte: elaboração dos autores.

Para avaliação das perguntas de pesquisa relacionadas aos efeitos das políticas de redução de velocidades na ocorrência de supersaturação, homogeneização do tráfego e em volumes e velocidades médias pontuais, foram considerados os dados dos radares em si, desconsiderando o que ocorre no trecho entre dois radares consecutivos. Considerando o período entre 2015 e 2022, a base geral dos radares aponta a existência de 1.113 locais distintos com a presença desses dispositivos. Nem todos se encontram ativos no momento da análise realizada neste estudo (agosto/2025), mas constam no histórico de monitoramento da cidade.

Considerando as vias que sofreram o tratamento das políticas de redução de velocidade resultantes do tratamento de dados relacionados aos tempos de viagem entre radares, a primeira etapa do processo de limpeza do banco de dados foi identificar quais radares tiveram as velocidades máximas de fiscalização reduzidas no curso do ano de 2015 (ver Figura 5, mapa b). Como resultado, um total de 537 radares foram localizados em vias que tiveram suas velocidades alteradas, e 576 radares em vias sem alteração de velocidade máxima.

No entanto, é possível que esses radares tenham sido instalados posteriormente à alteração da velocidade máxima permitida da via. Portanto, a segunda etapa refere-se à identificação de quais radares já estavam instalados quando a via sofreu a mudança de velocidade, e quais foram instalados posteriormente. Ao final, foram identificados 356 radares que, de fato, compreendem o período anterior às reduções de velocidade. A maioria das mudanças ocorreu entre julho/2015 e dezembro/2015 (Figura 9). Para o grupo de controle, foram excluídos radares instalados a partir de janeiro/2017, resultando em 503 radares que não sofreram nenhuma mudança de velocidade máxima e foram instalados antes de 31 de dezembro de 2016. A terceira etapa da limpeza de dados diz respeito à exclusão de radares do total de 859 que, porventura, não apresentaram nenhum registro de volumes e velocidades antes da alteração de velocidades. Ou seja, embora instalados, não estavam de fato registrando dados. A distribuição dos dias em que cada radar registrou ao menos um dado é apresentada na Tabela 4. Nesse caso, ao menos 723 radares apresentaram ao menos uma observação antes do início das alterações de velocidade em 20 de julho de 2015.

Tabela 4: Distribuição do número de dias em que o radar registrou algum volume antes de julho de 2015.

	Mín	25%	50%	Média	75%	Máx
Número de vezes em que o radar registra veículos entre 01/01 e 19/07/2015	1	158	186	169	197	200
Fonte: elaboração dos autores						

Nesse sentido, tomou-se a decisão pela permanência dos radares que apresentaram ao menos 60 observações antes do dia 20/07/2015¹¹ e ao menos 100 observações¹² durante todo o período de análise (jan/2015 a dez/2016). Como resultado, foram excluídos 10% dos radares, permanecendo um total de 646 radares, sendo 280 no grupo de tratamento e 436 no grupo de controle. A quantidade de dias em que cada radar registrou veículos entre 01/01/2015 e 31/12/2016 é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5: Distribuição do número de vezes em que o radar registrou algum volume entre 01 de janeiro de 2015 e 31 de dezembro de 2016.

	Mín	25%	50%	Média	75%	Máx
Número de vezes em que o radar registra veículos entre 01/01/2015 e 31/12/2015	350	649	700	681	719	731
Fonte: elaboração dos autores						

¹¹ O corte em 60 observações exclui 1,5% dos radares da amostra. Esse valor foi definido arbitrariamente, e outros cortes poderiam ser testados.

¹² Novamente, a escolha de manter na amostra radares com pelo menos 100 observações é arbitrária. Buscou-se um equilíbrio entre ter uma amostra com o maior número de radares possíveis, ao mesmo tempo em que cada radar tivesse uma boa cobertura no período do estudo.

A Tabela 6 apresenta o número de radares por subgrupo de tratamento após todas as limpezas aplicadas no banco de dados. Essa é a amostra final que será usada nas análises estatísticas.

Tabela 6: Número de radares por subgrupo de tratamento.

Mês	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Radares em vias tratadas	49	60	50	36	33	52
Peso do subgrupo nos radares em vias tratadas	17,5%	21,5%	17,8%	12,8%	11,9%	18,5%

Fonte: elaboração dos autores.

Nota: o grupo de controle possui 366 radares. O grupo de tratamento possui 280 radares, resultante da soma do número de rotas por subgrupo de tratamento por mês.

5.2 Análises Estatísticas: método *diferenças-em-diferenças*

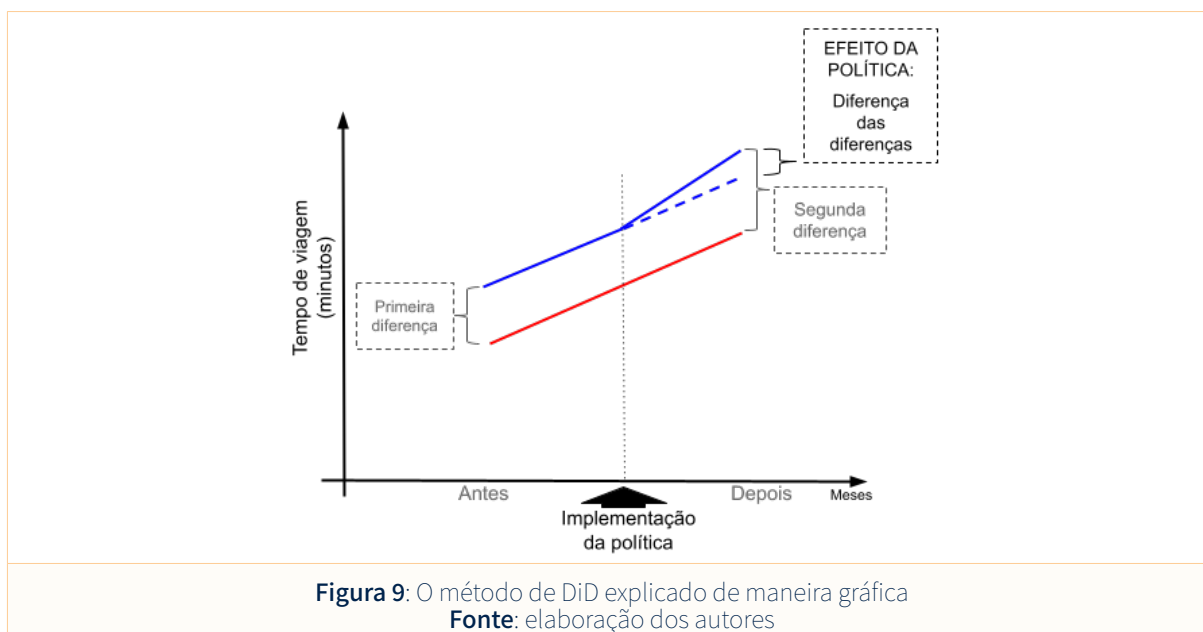
Para entender como a mudança de velocidade das vias afeta variáveis como o tempo de viagem ou a probabilidade de supersaturação, algumas pessoas podem pensar em usar (i) as medidas dessas variáveis antes e depois da alteração (variações no tempo apenas para rotas com velocidades alteradas), ou (ii) diferenças de médias entre rotas tratadas e não tratadas após a alteração de velocidade (variações entre grupos em um mesmo momento no tempo).

As duas estratégias podem ser problemáticas por diferentes razões. A primeira pode não ser fiel à realidade porque o comportamento do trânsito antes e depois da mudança pode ser diferente por razões que não têm a ver com a mudança (independência temporal). Um exemplo é a existência de sazonalidade: as ruas costumam ser mais movimentadas no segundo semestre, principalmente em dezembro. Se dezembro faz parte do período posterior à mudança, pode-se inferir que há um aumento no tempo de viagem, quando no fundo esse aumento se deve apenas a uma flutuação natural do comportamento do trânsito na cidade. A segunda medida também pode não refletir a realidade se as vias que receberam a mudança possuem dinâmicas de trânsito diferentes das vias que não receberam as mudanças (independência de médias).

Esse estudo utiliza, portanto, o método de *diferenças-em-diferenças* (*DiD*) para analisar como a mudança de velocidade afeta variáveis como os tempos de deslocamento, volume e velocidade pontual dos veículos. A vantagem desse método é a existência de um grupo de vias que não tiveram suas velocidades alteradas e que sofrem as mesmas influências não observadas que as vias tratadas, como a sazonalidade. Nesse método, a hipótese central é que as vias que não tiveram as velocidades alteradas têm uma tendência igual às vias que tiveram as velocidades alteradas em relação às variáveis que serão analisadas (tendências paralelas). Pode-se tomar o tempo de viagem como exemplo para explicar o método. Basta que as tendências em relação ao crescimento ou decréscimo nos tempos de viagem sejam iguais, não é preciso que as vias de cada um dos grupos tenham de fato o mesmo tempo de viagem. Por exemplo, se dezembro é um mês em que os tempos de viagem sobem, eles devem subir da mesma maneira nos dois grupos. Igualmente, se janeiro é um mês em que

os tempos de viagem diminuem, eles devem diminuir na mesma magnitude nos dois grupos. Assim, na ausência de tratamento, as vias que foram tratadas se comportariam de maneira semelhante às vias não tratadas.

O nome *diferenças-em-diferenças* vem do fato de que é realizada a subtração de duas diferenças para entender o efeito final de uma política em uma variável de interesse. Quando existem dois grupos (tratados e controle) e dois períodos (antes e depois), a primeira diferença diz respeito à diferença na variável de interesse entre o grupo tratado e controle antes da implementação da política; a segunda diferença, depois da implementação da política. Assim, o efeito da política vem da subtração entre a segunda e a primeira diferença. A hipótese fundamental (Figura 9) é que o grupo que foi tratado teria se comportado com a mesma tendência observada anteriormente (linha azul tracejada), e que é a mesma observada no grupo de controle. Assim, a diferença residual entre a diferença entre os dois períodos é o efeito do tratamento.



Além da hipótese de tendências paralelas, a validade do DiD supõe que as variáveis de interesse, como tempo de viagem, não sofreram alteração antes das mudanças de velocidade por causa da mudança de velocidade (não antecipação). Em alguns contextos, o anúncio da política já pode fazer com que as pessoas respondam à política, mesmo antes dela ser implementada. Esse tipo de comportamento não é o que os dados indicam para o caso analisado, já que motoristas buscam minimizar seus tempos de deslocamento e trafegam próximo à velocidade máxima que lhes é permitida. Assim, mesmo que motoristas soubessem que as velocidades seriam alteradas no futuro, isso não alterou seu comportamento no presente.

No caso deste estudo, há duas dificuldades para usar o método das *diferenças-em-diferenças*: primeiro, o tratamento não acontece no mesmo momento para todas as unidades que serão tratadas em algum momento. Na verdade, o tratamento é observado em diferentes momentos no tempo, não existindo apenas um antes e um depois para todas as observações do grupo de tratamento. É razoável supor que vias que recebem uma mudança de velocidade antes são diferentes das vias que recebem mudanças de velocidade depois. Pode ser que o poder público tenha priorizado vias mais congestionadas para começar, ou vias menos congestionadas. Nesse caso, o tempo em que cada via terá status *tratada* é diferente, algumas serão tratadas por mais tempo do que outras, podendo gerar viés no resultado final da análise. Evoluções metodológicas recentes no método de DiD permitem corrigir para esses possíveis vieses (Callaway e Sant’Anna, 2021).

Quando diferentes unidades são tratadas em diferentes momentos no tempo, cada data de tratamento define um subgrupo de tratamento e cada um desses subgrupos terá um peso correspondente à sua participação na amostra no resultado geral. No caso das rotas, usou-se o mês em que a rota foi tratada para definir o grupo de tratamento, conforme a Tabela 7.

Tabela 7: Número de rotas por subgrupo de tratamento

Mês	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Rotas tratadas	440	132	134	71	25	85
Peso do subgrupo nas rotas tratadas	49,6%	14,8%	15,1%	8,1%	2,8%	9,6%

Fonte: elaboração dos autores.

Nota: o grupo de controle possui 693 rotas. O grupo de tratamento possui 887 rotas, resultante da soma do número de rotas por subgrupo de tratamento por mês.

No banco de dados, cada observação corresponde a uma rota em uma determinada faixa horária por dia. Idealmente, o indicador de tratamento deveria ser atribuído com base no dia exato em que a mudança de velocidade ocorreu. No entanto, essa abordagem resultaria em um número excessivo de subgrupos de tratamento, muitos dos quais com poucas observações, o que comprometeria a robustez da análise. Diante disso, optou-se por definir o tratamento em nível mensal, agregando as rotas conforme o mês em que a alteração de velocidade foi implementada. Assim, mesmo que a velocidade tenha sido alterada no dia 19 do mês, o mês inteiro é considerado como posterior à alteração de velocidade.

A estimação do modelo DiD foi baseada pela seguinte regressão:

$$Y_{i,t,h} = \theta_t + \eta_i + \sum_{k=1}^{g-1} \beta_k (1\{G_i = g\} \cdot 1\{t = k\}) + \sum_{k=g}^T \beta_k (1\{G_i = g\} \cdot 1\{t = k\}) + \gamma_s + \delta_i \text{distância}_i + \varepsilon_{i,t,h} \quad (4)$$

Em que $Y_{\{i, t, h\}}$ denota a variável de interesse na rota i no dia t na hora h , θ_t é um efeito fixo temporal comum a todos os subgrupos de tratamento e grupo controle, η_i é um efeito fixo de rota, γ_s é um efeito fixo de dia da semana, δ_i controle para mudanças na distância das rotas analisadas, e β_k é o parâmetro de interesse. A omissão da interação do indicador de tratamento e do subgrupo para o mês $t = g - 1$ evita multicolinearidade e fixa $g - 1$ como o período de referência para a estimação de β_k .

A fim de ter apenas um coeficiente para cada hora, os coeficientes β_k para cada subgrupo foram agrupados tomando a média ponderada dos mesmos, de acordo com o tamanho de cada subgrupo de tratamento. Assim, o subgrupo que foi tratado no mês de julho terá mais peso no resultado final do que os demais (Tabela 7).

Quando os dados possuem uma série histórica, isso é, são medidos em diversos momentos no tempo, é possível complementar o método de DiD com o método de *estudo de eventos*. O método de *estudo de eventos* requer as mesmas hipóteses do método de DiD - tendências paralelas e não antecipação, mas elas precisam se manter para todos os períodos observados. A hipótese de tendências paralelas é mais difícil de se sustentar quanto maior for a janela temporal pós-intervenção. Assim, este estudo focou em analisar as variáveis de interesse

até um ano depois da última mudança de velocidade, ou seja, até dezembro de 2016.

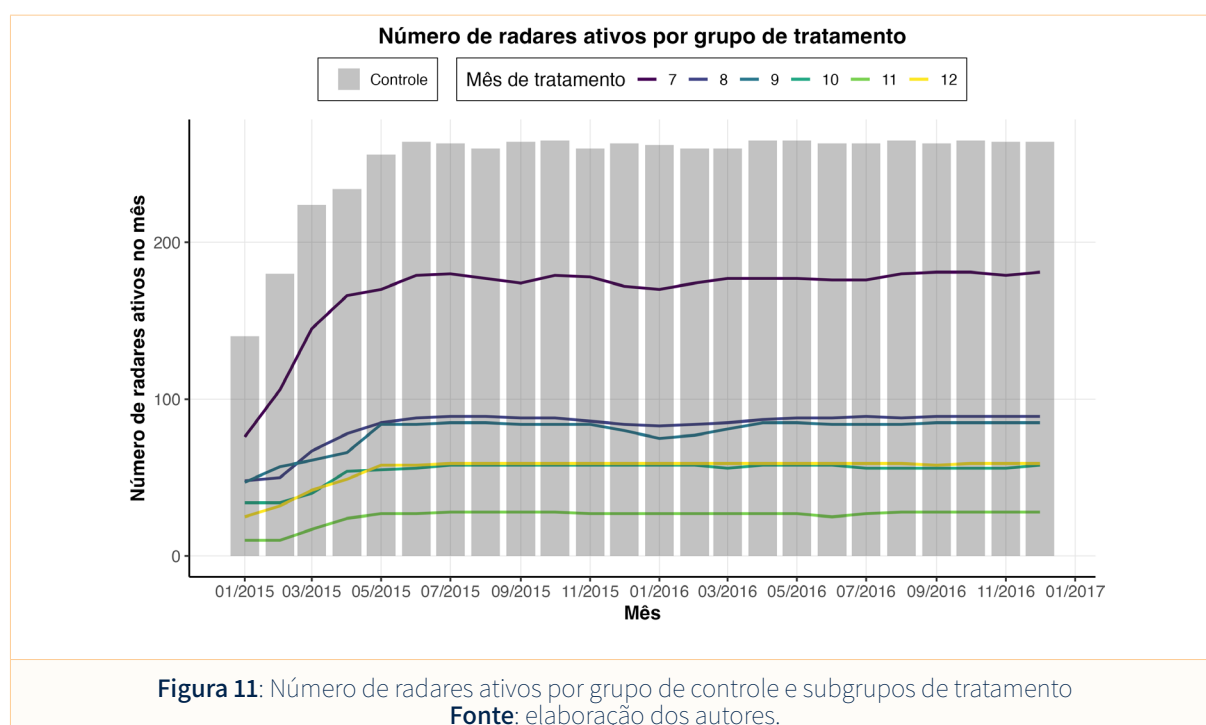
Matematicamente, o *estudo de eventos* vai ter um coeficiente β_k (Equação 4) para cada mês, comparando o grupo de controle e de tratamento em cada mês, ao invés de estimar um parâmetro único como no DiD. A média dos coeficientes β_k do *estudo de eventos* nos meses posteriores ao tratamento será igual ao coeficiente β_k do DiD.

Uma vantagem do *estudo de eventos* é a possibilidade de testar tendências paralelas nos períodos que antecedem a intervenção. Para esses períodos, as diferenças médias observadas entre rotas tratadas e rotas controle devem ser zero. É impossível verificar se essa situação se mantém nos períodos pós-intervenção, no caso hipotético das unidades tratadas não terem sido tratadas. Por isso, o teste de tendências paralelas pré-intervenção só confirma parcialmente a hipótese de tendências paralelas, mas essa é a abordagem mais utilizada na literatura.

5.2.1 Análise descritiva do banco de dados

Conforme apresentado na Seção 5.1, o primeiro passo do método adotado foi tratar, filtrar e delimitar os dados, a fim de construir um banco de dados compatível com as análises desejadas.

A expansão no número de radares na cidade de São Paulo que teve início em 2015 fica muito evidente nos dados. Até junho daquele ano, observou-se um crescimento contínuo na quantidade de radares nas rotas monitoradas. A partir de julho, entretanto, esse número se estabilizou, indicando o fim da fase de implantação mais intensa. Na Figura 10, o eixo X representa os meses utilizados na análise (jan/2015 até dez/2016) e o eixo Y representa o número de radares ativos no mês. As barras trazem o número de radares ativos para o grupo de controle e as linhas trazem o número de radares ativos em cada um dos subgrupos de tratamento. As Figuras seguintes terão o mesmo padrão, alterando a variável do eixo Y.



O número de rotas observadas apresenta uma correlação direta com a quantidade de radares ativos na cidade: quanto maior o número de radares em operação, maior o número de rotas disponíveis para análise (Figura 11). Em janeiro de 2015, havia ainda poucas rotas registradas, mas esse número cresceu rapidamente ao longo do primeiro semestre, estabilizando-se a partir de setembro de 2015. As variações observadas após esse período refletem principalmente a sazonalidade do trânsito na cidade de São Paulo.

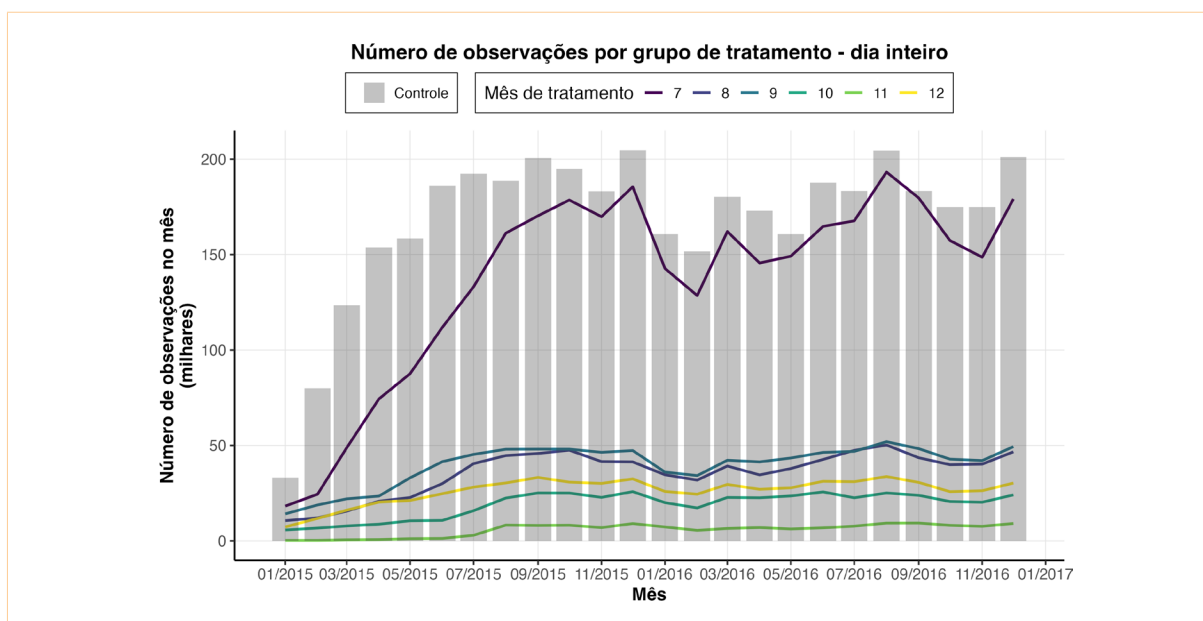


Figura 12: Número de rotas no banco de dados por mês por grupo de controle e subgrupos de tratamento
Fonte: elaboração dos autores.

Também é possível analisar o fluxo de veículos por rota. Embora o grupo de controle concentre um número maior de radares e rotas, essas tendem a apresentar, em média, um volume de veículos inferior. A Figura 12 ilustra esse comportamento: no subgrupo tratado em julho, observa-se a incorporação gradual de rotas menos movimentadas, o que resulta em uma queda na média de veículos por rota a partir de agosto de 2015 — justamente quando há um aumento expressivo no número de rotas monitoradas.

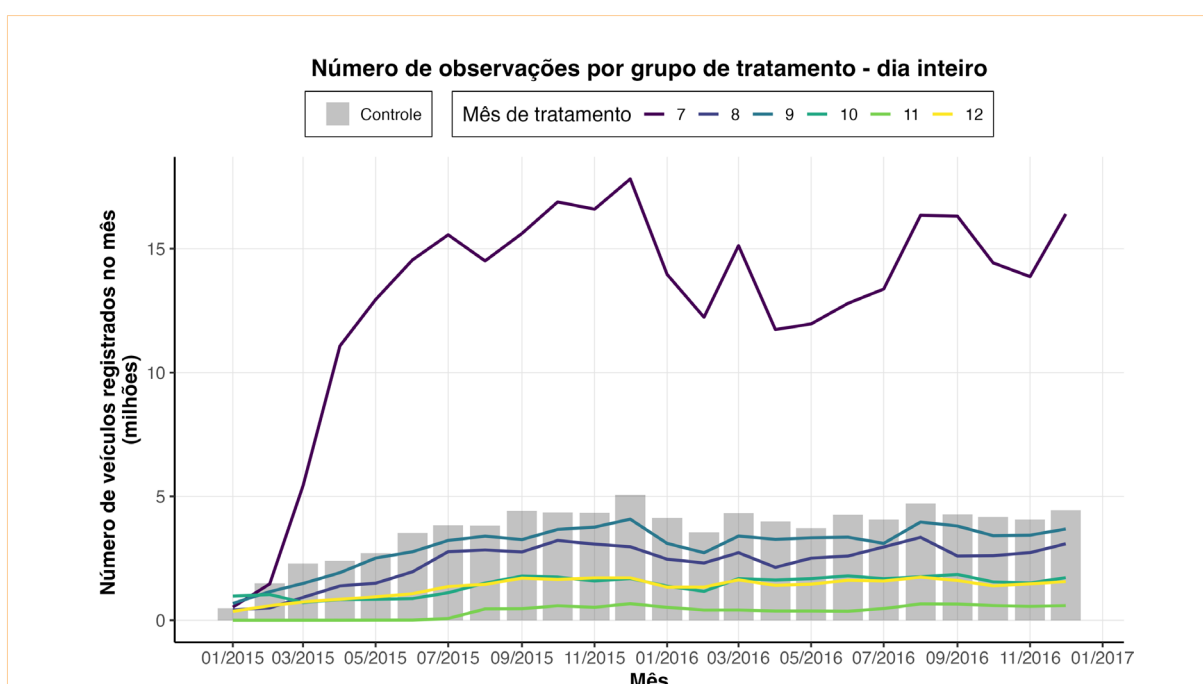


Figura 12: Número médio de veículos registrados no mês por grupo de controle e subgrupos de tratamento
Fonte: elaboração dos autores.

Por fim, pode-se analisar o tamanho das rotas monitoradas (Figura 13). Com uma mudança no conjunto de radares, as rotas mais importantes para cada origem podem mudar ao longo do tempo. Percebe-se que em 2015 há uma maior variação na distância média das rotas de cada grupo, principalmente no subgrupo de rotas tratadas no mês de julho de 2015 e em novembro de 2015. A variabilidade no subgrupo de novembro de 2015 é esperada porque esse é o subgrupo com o menor número de rotas, apenas 25.

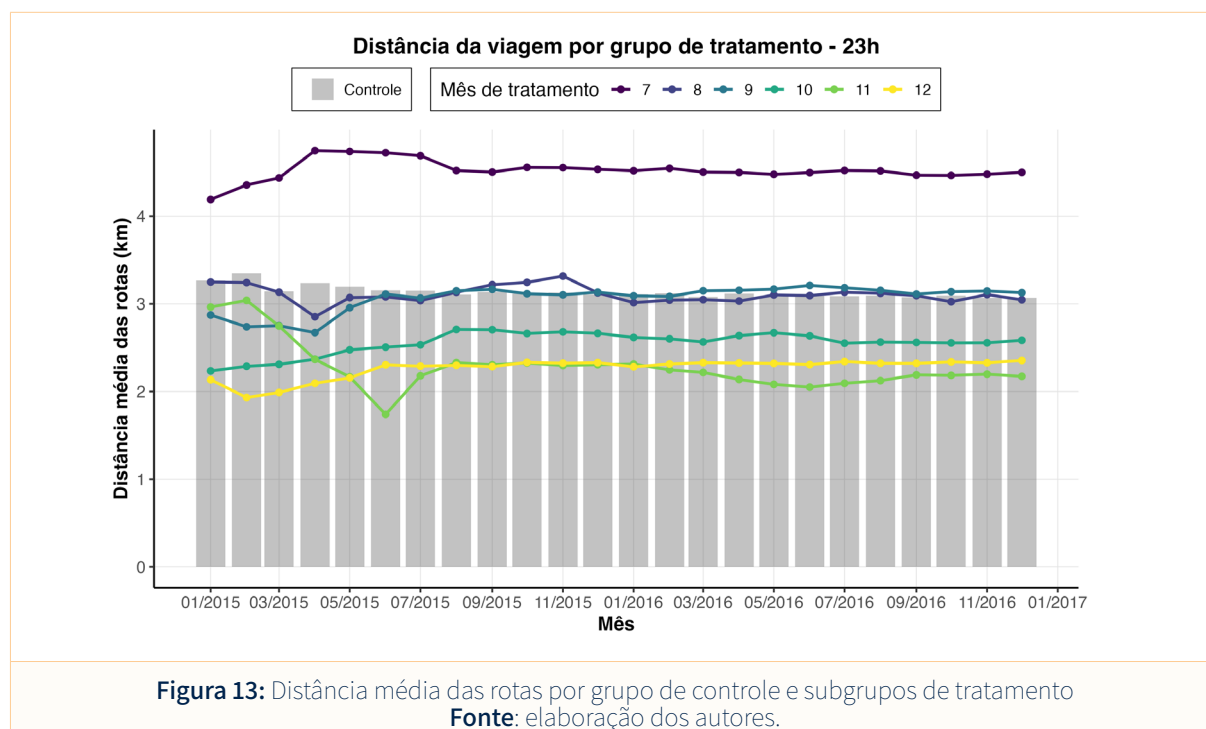
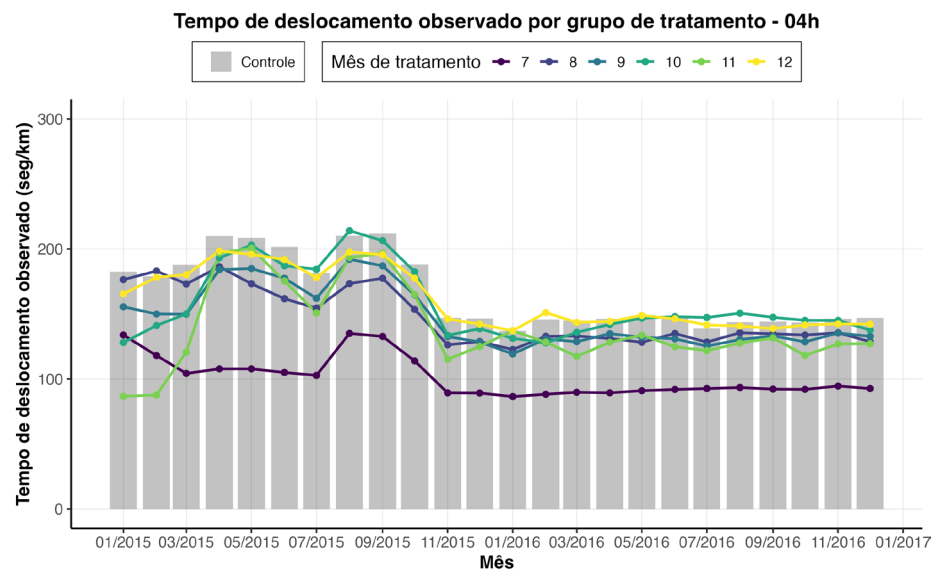
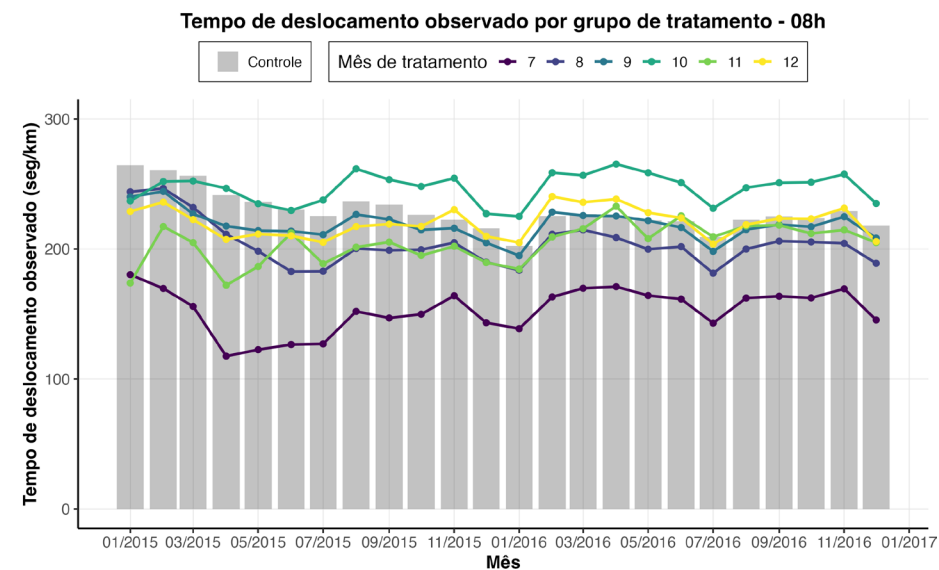


Figura 13: Distância média das rotas por grupo de controle e subgrupos de tratamento
Fonte: elaboração dos autores.

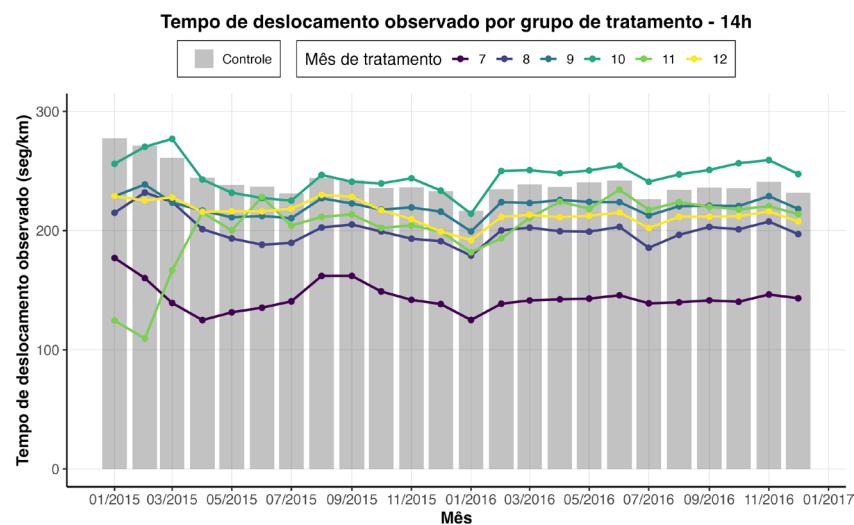
Para a análise dos tempos de deslocamento das viagens (seg/km), serão apresentados gráficos específicos para as quatro faixas horárias representativas (Figura 14): madrugada (4h), pico manhã (8h), entre picos (14h) e pico tarde (19h). Como esperado, os menores tempos de deslocamento ocorrem às 4h da manhã. Nessa faixa, observa-se um forte efeito de composição tanto nas rotas tratadas quanto nas de controle, com uma queda acentuada nos tempos de viagem entre outubro e novembro de 2015. Nos demais horários (8h, 14h e 19h), esse comportamento não se repete. Nesses períodos, os dados revelam um padrão marcado pela sazonalidade, com os menores tempos de viagem registrados em janeiro e julho. As reduções observadas nesses meses são mais pronunciadas nos horários de pico (8h e 19h) do que no horário intermediário (14h), o que pode indicar maior pressão de congestionamento — ou mesmo supersaturação — durante os picos de demanda.



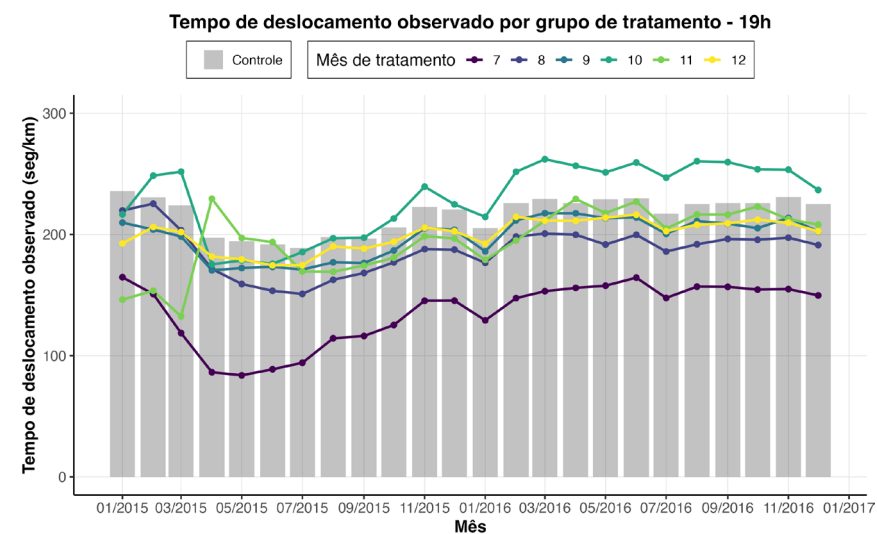
a) Tempo de deslocamento às 04h



b) Tempo de deslocamento às 08h



c) Tempo de deslocamento às 14h



d) Tempo de deslocamento às 19h

Figura 14: Tempo de viagem por grupo de controle e subgrupos de tratamento em horas selecionadas.
Fonte: elaboração dos autores

6. Resultados

6.1 Análise dos tempos de viagem (segundos por km)

Essa seção apresenta os resultados para as estimações do modelo DiD. As estimações foram realizadas separadamente para cada hora do dia, uma vez que uma agregação diária poderia gerar um efeito médio distorcido — especialmente porque horários com baixo volume de observações poderiam influenciar de forma desproporcional os resultados.

Os resultados serão apresentados na seguinte ordem:

- A.** valor médio do coeficiente β_k do DiD para cada hora;
- B.** *estudo de eventos* para as horas 4h, 8h, 14h e 19h. Os resultados para as demais horas podem ser disponibilizados sob demanda;
- C.** valor médio do coeficiente β_k do DiD para cada hora separando o subgrupo de tratamento 7 (julho) dos demais subgrupos.

A variável de interesse será o tempo de viagem, medido em segundos por quilômetro. Como as rotas analisadas são muito curtas (entre 2 e 4,5 km, em média), pequenas variações no tempo total de viagem entre o radar de início e o radar de fim da rota podem levar a resultados muito significativos nas regressões. Além disso, como o total de rotas em cada dia varia de acordo com os radares que estão ativos na cidade naquele dia, a composição diária das rotas pode influenciar os resultados (o tempo médio de viagens pode cair entre um dia e outro pela inclusão de rotas mais curtas na análise). Assim, decidiu-se analisar uma medida padronizada e mais comparável para rotas de diferentes tamanhos: tempo de viagem por quilômetro, medido em segundos (seg/km).

A Tabela 8 traz a correspondência entre as velocidades em quilômetros por hora, usualmente reconhecidas pelo público em geral, e os tempos de viagem em segundos por quilômetro, uma métrica que não é muito utilizada no dia-a-dia.

Tabela 8: Correspondência entre km/h e seg/km.

km/h	seg/km
10	360
20	180
30	120
40	90
50	72
60	60
70	51
80	45
90	40

Fonte: elaboração dos autores.

A Figura 15 apresenta os resultados do coeficiente estimado no modelo DiD (β_k Equação 4) para cada hora. O impacto da alteração dos limites de velocidade na mudança dos tempos de viagem é maior no pico da manhã, com acréscimos de até 23,4 segundos por quilômetro percorrido. Esse resultado pode ser interpretado como: para rotas do mesmo tamanho e aferidas no mesmo dia da semana, o efeito da política sobre o tempo de viagem foi de, no máximo, 23,4 segundos por quilômetro.

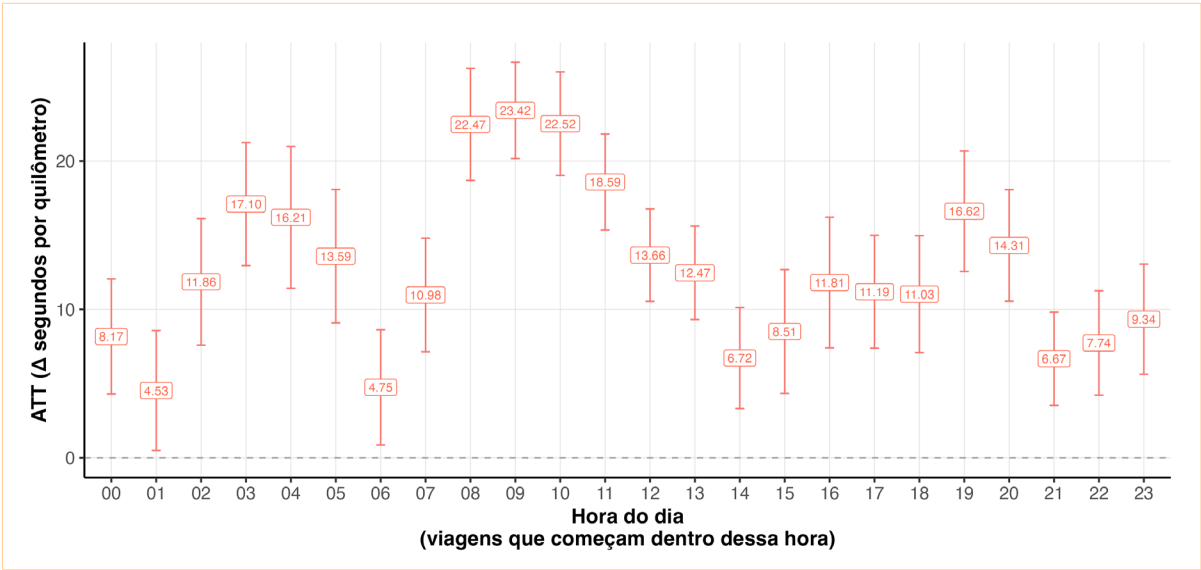


Figura 15: resultados médios por hora.
Fonte: elaboração dos autores.

Notas: essa figura representa o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT na sigla em inglês) da agregação do estudo de eventos para cada hora em um único coeficiente médio. A variável dependente é o tempo de viagem em cada rota num determinado horário num determinado dia em segundos por quilômetro, conforme equação (4). Para a agregação do efeito dinâmico em um coeficiente simples, cada subgrupo de tratamento recebeu um peso equivalente ao seu peso na amostra. Utilizou-se o pacote em linguagem R chamado *did* de Callaway e Sant’Anna (2021) para as estimações.

Sem os valores de referência do tempo de viagem (seg/km) no período anterior à mudança de velocidade é difícil entender a magnitude de um acréscimo de 10 ou 20 segundos ao tempo total. A coluna destacada em vermelho na Tabela 8 apresenta os valores numéricos que são observados na Figura 16, ou seja, essa coluna apresenta a variação no tempo de deslocamento nas rotas tratadas após a mudança de velocidade.

As duas As duas primeiras colunas da Tabela 9 mostram as velocidades médias aferidas nos meses antes da mudança de velocidade. Conforme esperado, as velocidades são maiores nas madrugadas (cerca de 30km/h), e menores entre 5h e 18h, quando variam entre 20 e 17 km/h. Para cada velocidade média é informado o tempo de deslocamento (seg/km) correspondente. Por exemplo, à meia-noite (00h) a velocidade média antes da mudança de velocidade era de 31,02 km/h, o que corresponde a 116,05 segundos por km. Após a mudança de velocidade, o tempo de deslocamento teve um acréscimo de 8,17 segundos por quilômetro (coluna vermelha), o que corresponde a uma redução de 2,04 km/h na velocidade média. Em termos percentuais, o incremento de 8,17 segundos no tempo de viagem corresponde a um aumento de 7,04%, e esse aumento é estatisticamente significativo, indicado pelo * na última coluna da tabela. Se o resultado não é estatisticamente significativo, então a linha não recebe *.

Os maiores impactos são verificados ao final do pico da manhã, entre 8h e 11h. Por exemplo, às 9h, observou-se um acréscimo de 23,4 seg/km, o equivalente a uma queda de 2,2 km/h na velocidade média dos veículos. Para viagens de aproximadamente 5 km, observou-se um aumento de 1 minuto e 57 segundos no tempo de viagem.

Tabela 9: resultados médios por hora considerando todos os subgrupos de tratamento

Hora	Antes da mudança de velocidade		Variação após mudança de velocidade			
	Velocidade média (km/h)	Tempo de deslocamento (seg/km)	Velocidade média (km/h)	Tempo de deslocamento (seg/km)	Variação percentual	
0	31.02	116.05	-2.04	8.17	7.04%	*
1	32.22	111.72	-1.25	4.53	4.05%	*
2	31.94	112.70	-3.04	11.86	10.52%	*
3	28.47	126.45	-3.39	17.10	13.52%	*
4	23.39	153.93	-2.23	16.21	10.53%	*
5	20.28	177.54	-1.44	13.59	7.65%	*
6	19.06	188.83	-0.46	4.75	2.52%	*
7	19.07	188.80	-1.05	10.98	5.82%	*
8	19.03	189.21	-2.02	22.47	11.88%	*
9	19.51	184.57	-2.20	23.42	12.69%	*
10	19.83	181.54	-2.19	22.52	12.40%	*
11	19.87	181.19	-1.85	18.59	10.26%	*
12	19.83	181.57	-1.39	13.66	7.52%	*
13	19.68	182.97	-1.26	12.47	6.82%	*
14	18.96	189.87	-0.65	6.72	3.54%	*
15	18.62	193.38	-0.79	8.51	4.40%	*
16	17.74	202.98	-0.98	11.81	5.82%	*
17	19.12	188.29	-1.07	11.19	5.94%	*
18	20.77	173.30	-1.24	11.03	6.36%	*
19	23.06	156.14	-2.22	16.62	10.64%	*
20	23.40	153.84	-1.99	14.31	9.30%	*
21	25.44	141.49	-1.14	6.67	4.71%	*
22	27.52	130.80	-1.53	7.74	5.92%	*
23	29.33	122.75	-2.08	9.34	7.61%	*

Fonte: Elaboração dos autores

Notas: essa tabela apresenta algumas informações para cada hora do dia. A primeira coluna é a hora, a segunda coluna apresenta a velocidade média e o tempo de deslocamento médio para aquelas horas nos meses antes da alteração de velocidade. Após a linha divisória, são apresentados os valores da análise estatística. A coluna vermelha apresenta o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT na sigla em inglês) da agregação do estudo de eventos para cada hora em um único coeficiente médio. A variável dependente é o tempo de viagem em cada rota num determinado horário num determinado dia em segundos por quilômetro, conforme equação (4). Para a agregação do efeito dinâmico em um coeficiente simples, cada subgrupo de tratamento recebeu um peso equivalente ao seu peso na amostra. Utilizou-se o pacote em linguagem R chamado *did* de Callaway e Sant'Anna (2021) para as estimações. Na coluna ao lado esquerdo da coluna em vermelho é apresentada a variação na velocidade média dada a variação nos tempos de deslocamento. A coluna de variação percentual mostra como a alteração no tempo de deslocamento (em vermelho) se relaciona com o tempo de deslocamento inicial (em cinza). Por fim, a última coluna apresenta * quando a variação no tempo de deslocamento (em vermelho) é estatisticamente significativa, e nada do contrário.

Também analisou-se o peso de cada subgrupo no efeito final, que se observa tanto de maneira agregada por hora quanto no *estudo de eventos* de cada hora. Julho de 2015 (mês de tratamento 7) é o mês com maior número de vias com tratamento em relação aos demais meses do ano e também em que se concentram os resultados. Portanto, esse mês foi separado como subgrupo, composto de 49,6% das rotas tratadas, enquanto os demais subgrupos (meses) possuem 51,4% das rotas no total. Assim, o subgrupo tratado no mês de julho de 2015 será usado como uma subamostra, e os demais subgrupos como outra subamostra, e as análises estatísticas serão feitas para cada uma dessas subamostras.

A mudança de velocidade no subgrupo 7 se deu logo antes da estabilização no número de radares ativos nas vias que o compõem. Conforme os dados apresentados na Figura 11, o número de radares neste subgrupo se estabiliza em maio de 2015 e a mudança ocorre logo depois, na metade de julho de 2015. Assim, parte do efeito observado no aumento nos tempos de deslocamento pode ser proveniente da mudança de composição desse subgrupo. Além disso, esse subgrupo é composto majoritariamente por vias de trânsito rápido, que têm uma dinâmica diferente da maioria das vias do subgrupo de controle (Figura 16).

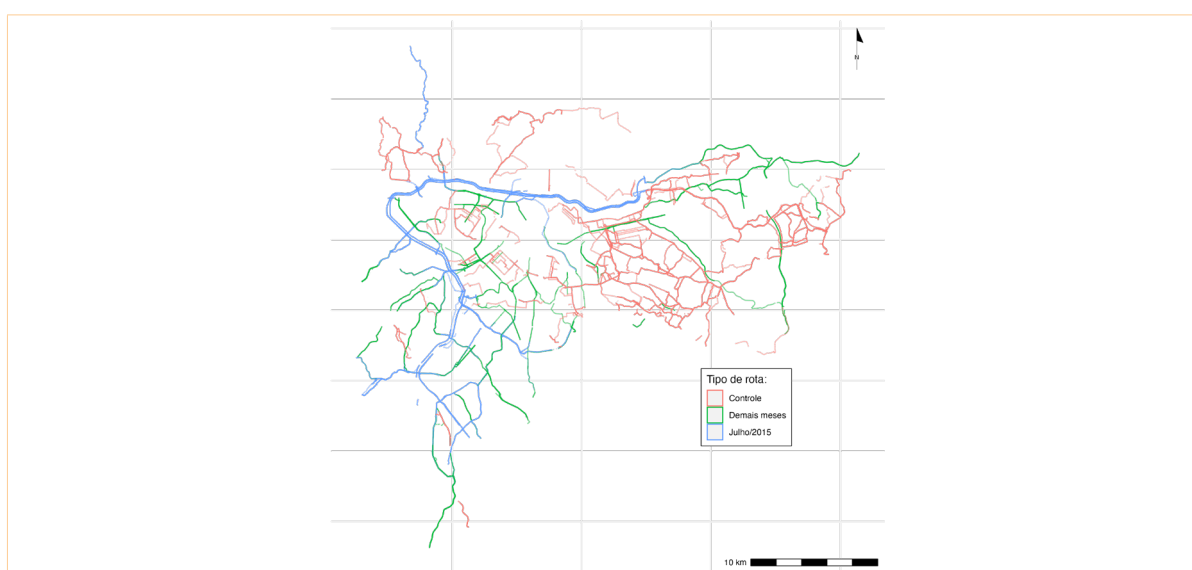


Figura 16: Mapa das vias tratadas divididas em duas subamostras, e das vias de controle
Fonte: elaboração dos autores.

Ao excluir as rotas do subgrupo 7, o efeito da mudança de velocidade sobre os tempos de deslocamento é muito pequeno e estatisticamente não significativo para muitas horas do dia (Tabela 10, coluna vermelha). O efeito é significativo entre 8h e 15h e às 19h e 20h, mas inferior a um 1km/h (Tabela 9, última coluna). O efeito é inclusive negativo para as 6h da manhã, ou seja, nessa faixa horária houve uma redução nos tempos de viagem.

Como essas rotas são em vias com intersecções semaforicas e outras interrupções, as velocidades médias já giravam em torno de 16 km/h antes da alteração da velocidade máxima. Tomando 9h da manhã como exemplo, a velocidade média era de 16,58 km/h, o equivalente a um tempo de viagem de 217 seg/km. Após a mudança de velocidade, o tempo de deslocamento aumenta em 7,67 seg/km, e a velocidade média cai para 16,01 km/h. Em uma viagem de 5 km, isso implicaria um aumento de 38 segundos no deslocamento, e em uma viagem de 10 km, pouco mais de 1 minuto.

O maior efeito estatisticamente significativo acontece às 8h, sendo de 8,55 seg/km, o que implicaria em um aumento de 42 segundos para uma viagem de 5 km. O menor efeito estatisticamente significativo ocorre às 6h, sendo de -5,44 seg/km, o que implicaria em uma redução de 27 segundos para uma viagem de 5 km.

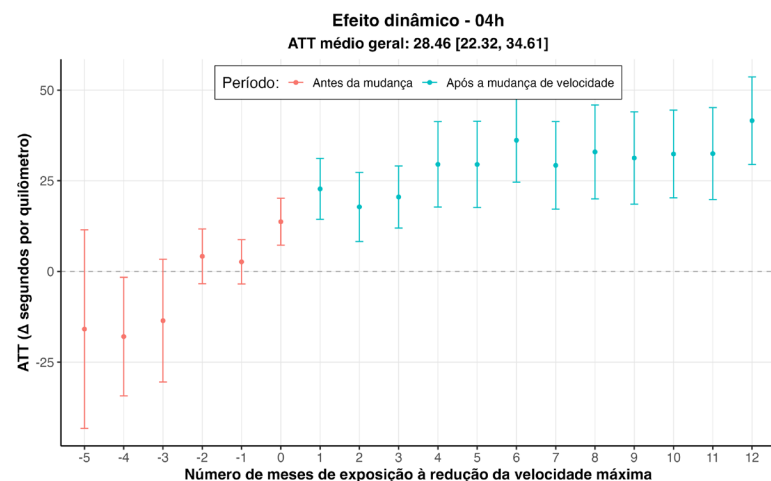
Tabela 10: Resultados médios por hora excluindo as rotas tratadas no mês de julho.

Hora	Antes da mudança de velocidade		Variação após mudança de velocidade		
	Velocidade média (km/h)	Tempo de deslocamento (seg/km)	Velocidade média (km/h)	Tempo de deslocamento (seg/km)	Variação percentual
0	26.83	134.19	-0.96	4.99	3.72% *
1	27.56	130.63	-0.11	0.52	0.40%
2	27.07	133.01	-0.99	5.05	3.80%
3	24.21	148.70	-1.07	6.89	4.64% *
4	20.01	179.93	-0.45	4.14	2.30%
5	17.37	207.20	-0.16	1.96	0.95%
6	16.47	218.61	0.42	-5.44	-2.49% *
7	16.48	218.51	-0.01	0.09	0.04%
8	16.35	220.14	-0.61	8.55	3.88% *
9	16.58	217.15	-0.57	7.67	3.53% *
10	16.71	215.49	-0.57	7.57	3.51% *
11	16.74	215.04	-0.49	6.42	2.99% *
12	16.80	214.25	-0.39	5.05	2.36% *
13	16.73	215.22	-0.38	4.97	2.31% *
14	16.45	218.84	-0.31	4.19	1.92% *
15	16.17	222.65	-0.30	4.26	1.91% *
16	15.51	232.16	-0.02	0.23	0.10%
17	16.55	217.56	-0.07	0.91	0.42%
18	17.85	201.71	-0.26	2.93	1.45%
19	19.62	183.46	-0.76	7.38	4.02% *
20	20.33	177.06	-0.73	6.59	3.72% *
21	22.08	163.03	-0.35	2.65	1.62%
22	23.85	150.97	-0.66	4.33	2.87% *
23	25.43	141.58	-0.46	2.61	1.85% *

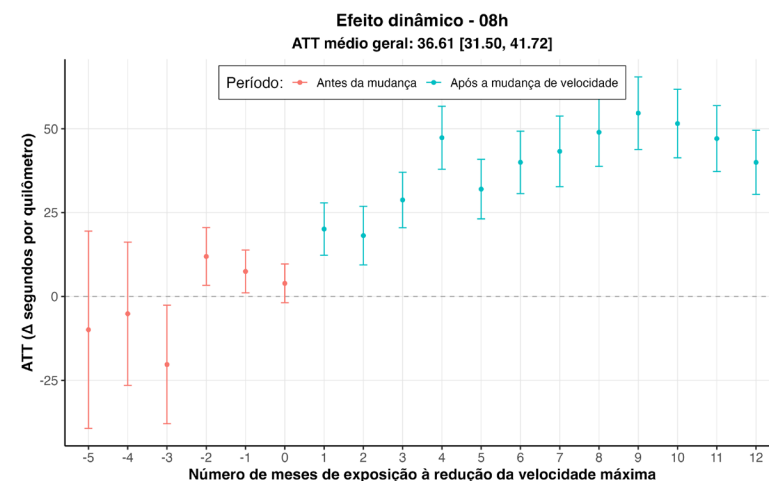
Fonte: Elaboração dos autores

Notas: essa tabela apresenta algumas informações para cada hora do dia. A primeira coluna é a hora, a segunda coluna apresenta a velocidade média e o tempo de deslocamento médio para aquelas horas nos meses antes da alteração de velocidade. Após a linha divisória, são apresentados os valores da análise estatística. A coluna vermelha apresenta o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT na sigla em inglês) da agregação do estudo de eventos para cada hora em um único coeficiente médio. A variável dependente é o tempo de viagem em cada rota num determinado horário num determinado dia em segundos por quilômetro, conforme equação (4), excluindo as rotas tratadas no mês 7. Para a agregação do efeito dinâmico em um coeficiente simples, cada sub-grupo de tratamento recebeu um peso equivalente ao seu peso na amostra. Utilizou-se o pacote em linguagem R chamado *did* de Callaway e Sant'Anna (2021) para as estimações. Na coluna ao lado esquerdo da coluna em vermelho é apresentada a variação na velocidade média dada a variação nos tempos de deslocamento. A coluna de variação percentual mostra como a alteração no tempo de deslocamento (em vermelho) se relaciona com o tempo de deslocamento inicial (em cinza). Por fim, a última coluna apresenta * quando a variação no tempo de deslocamento (em vermelho) é estatisticamente significativa, e nada do contrário.

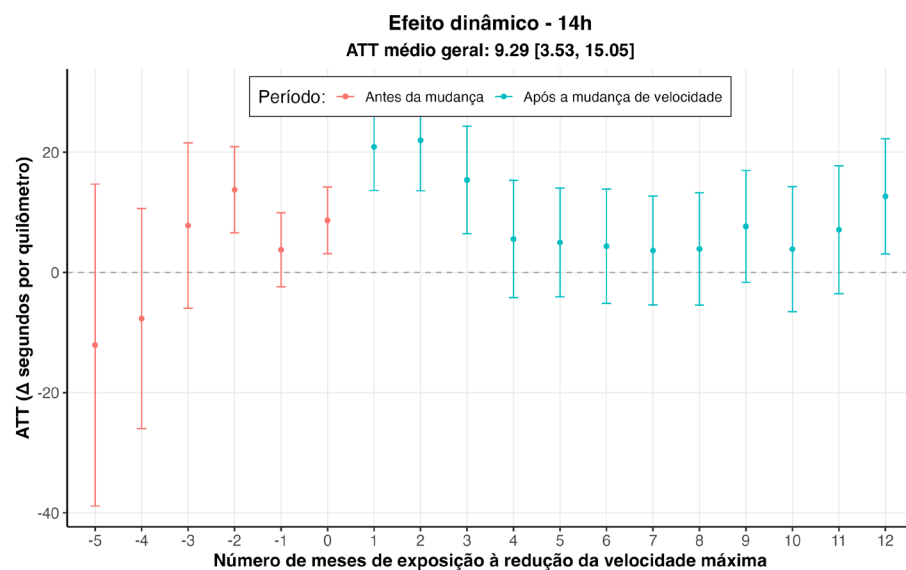
Há uma grande limitação nos dados das rotas tratadas em julho de 2015. A hipótese que sustenta o método *diferenças-em-diferenças* é a existência de tendências paralelas entre os grupos de controle e tratamento nos períodos anteriores ao tratamento, e que essa tendência paralela se manteria na ausência de tratamento. Uma das maneiras de testar essa hipótese é olhar o comportamento do coeficiente do *estudo de eventos* nos períodos anteriores à intervenção. A observação dos gráficos de *estudo de eventos* para o conjunto de rotas tratadas no mês 07 de 2015 não permite afirmar que existiam tendências paralelas entre os grupos de controle e tratamento. Há indícios de que o conjunto de rotas tratadas no mês 07 de 2015 já vinha experimentando um aumento nos tempos de viagem, mesmo antes do tratamento (Figura 17). Assim, é difícil separar quanto do aumento dos tempos de viagem observado após as mudanças de velocidade se deve à política de fato, e quanto é parte de uma tendência de aumento que já estava em curso. Dessa maneira, o resultado para esse grupo não será apresentado aqui, e pode ser encontrado no Apêndice A1.



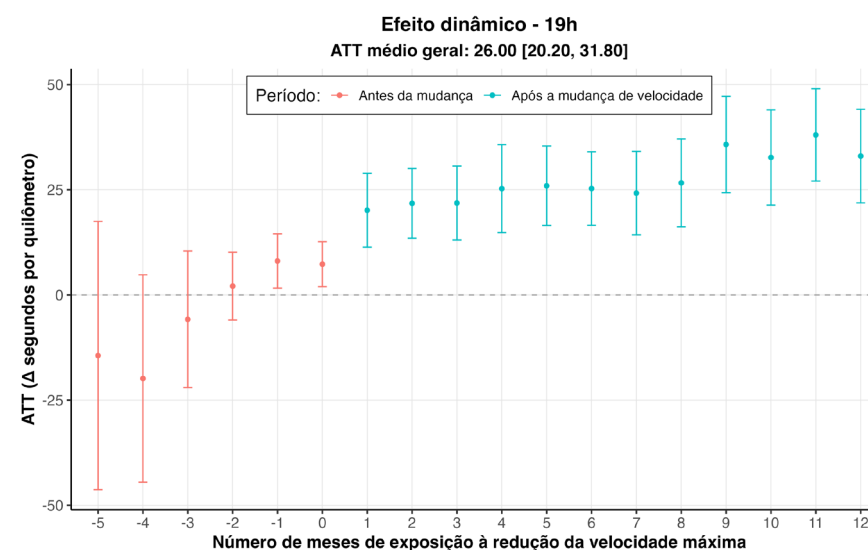
a) Resultados para 04h



b) Resultados para 12h



c) Resultados para 14h



d) Resultados para 19h

Figura 17: estudo de eventos para as rotas tratadas no mês de julho de 2015 e horas selecionadas
Fonte: elaboração dos autores

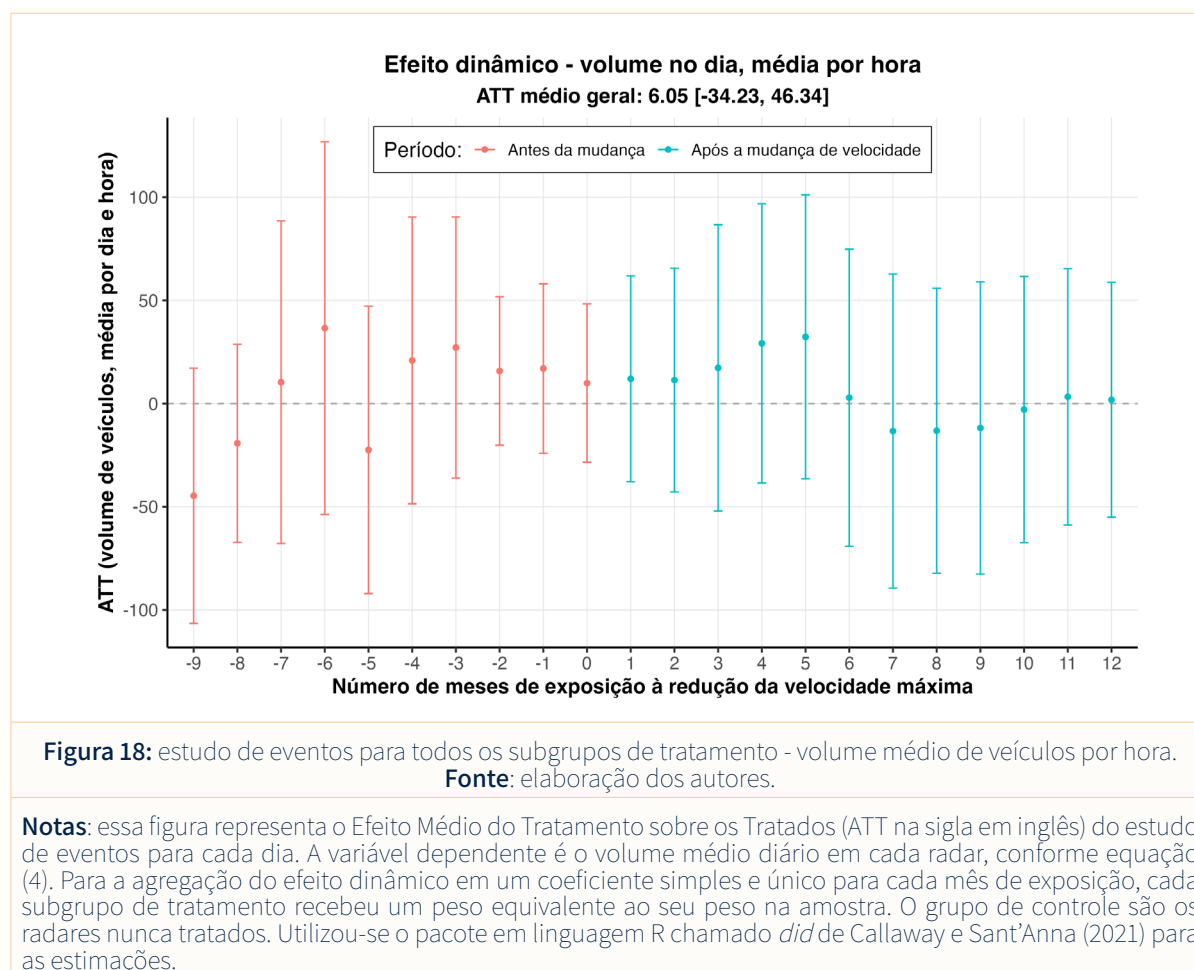
Notas: essas figuras representam o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT na sigla em inglês) do estudo de eventos para cada hora selecionada, considerando apenas as rotas tratadas no mês 07 de 2015. A variável dependente é o tempo de viagem em cada rota num determinado horário num determinado dia em segundos por quilômetro, conforme equação (4). Utilizou-se o pacote em linguagem R chamado *did* de Callaway e Sant'Anna (2021) para as estimações.

6.2 Análise do volume total e da velocidade média por ponto

6.2.2 Resultados da análise de volumes

A análise estatística segue a mesma lógica apresentada na seção 6.1, Equação (4), na qual a variável dependente é a média do volume de veículos por hora. Usando os dados disponíveis, é possível observar que o efeito da mudança de velocidade sobre o volume de veículos nas vias tratadas é nulo. O fato de diminuir a velocidade máxima permitida não faz com que o volume de veículos que passa por aquelas vias diminua.

Embora os princípios de Equilíbrio do Usuário indiquem que parte dos usuários mude de rota e outros ocupem o seu lugar, o fato de que os volumes nas vias que receberam tratamento de redução de velocidades não diminuam indica que, mesmo que a velocidade máxima permitida seja menor, a via continua sendo atrativa. O efeito estimado é de um aumento de 6 veículos por hora, sendo um efeito estatisticamente não significativo (Figura 18).



Também foram realizadas análises para cada faixa horária ao longo do dia. Mais uma vez, nenhum impacto estatisticamente significativo é observado nos volumes de veículos, com exceção de um pequeno efeito na madrugada, entre 0h e 2h (Figura 19). É interessante notar como o volume de veículos registrados por hora tem uma variabilidade muito menor entre meia noite e cinco da manhã. A partir do momento em que as vias começam a ficar mais congestionadas, os intervalos de confiança aumentam - indicando maior variabilidade.

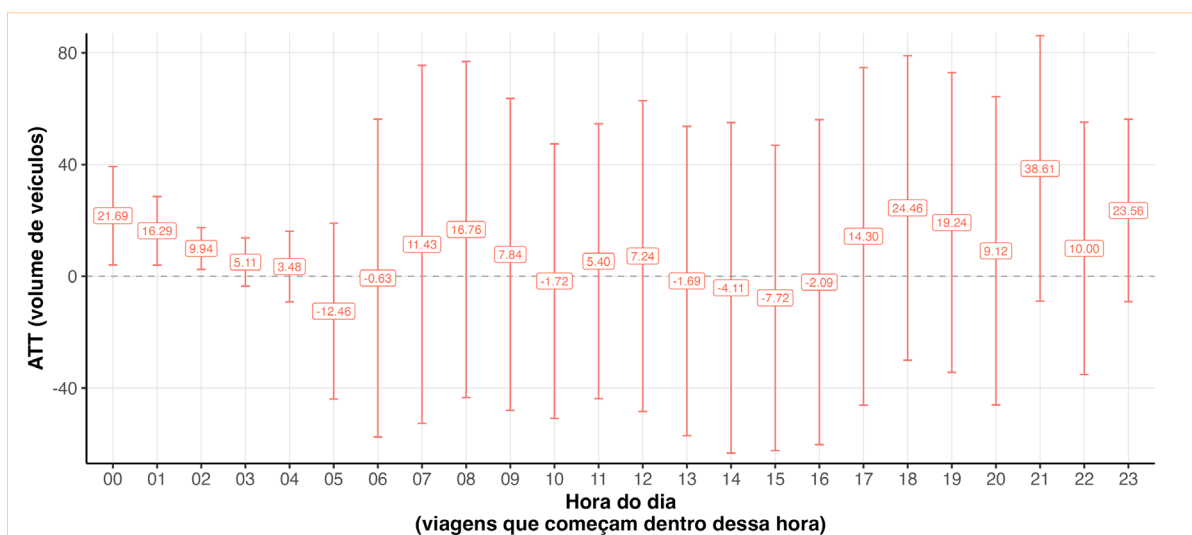


Figura 19: resultados médios por hora - volume de veículos
Fonte: elaboração dos autores.

Notas: essa figura representa o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT na sigla em inglês) da agregação do estudo de eventos para cada hora em um único coeficiente médio. O grupo de controle são as rotas nunca tratadas. A variável dependente é o volume de veículos registrados num determinado horário num determinado dia, conforme equação (4). Para a agregação do efeito dinâmico em um coeficiente simples, cada subgrupo de tratamento recebeu um peso equivalente ao seu peso na amostra. Utilizou-se o pacote em linguagem R chamado *did* de Callaway e Sant'Anna (2021) para as estimações.

O impacto foi separado entre o subgrupo de radares em vias que tiveram a redução de velocidade em julho de 2015, e nos meses subsequentes. Para os radares em vias que tiveram a velocidade reduzida a partir de agosto de 2015, também não parece haver uma alteração significativa nos volumes observados. Observa-se apenas uma redução para as horas 5h e 15h (Figura 20).

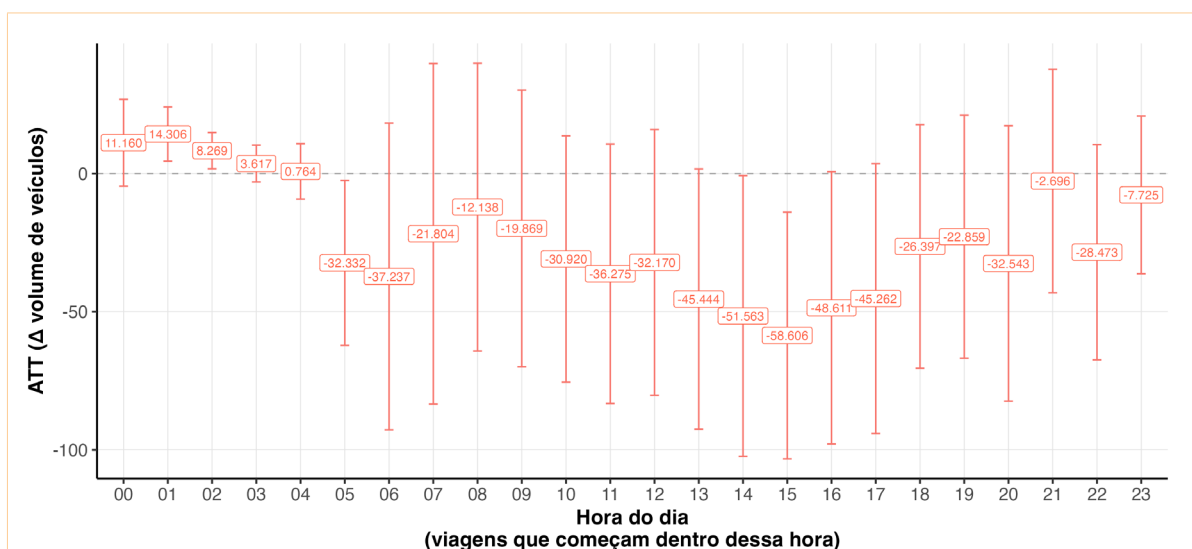


Figura 20: resultados médios por hora - volume de veículos velocidade média excluindo radares em vias tratadas no mês de julho de 2015.
Fonte: elaboração dos autores.

Notas: essa figura representa o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT na sigla em inglês) da agregação do estudo de eventos para cada hora em um único coeficiente médio. O grupo de controle são as rotas nunca tratadas e o grupo de tratamento exclui radares em vias que tiveram alteração de velocidade no mês de julho de 2015. A variável dependente é o volume de veículos registrados num determinado horário num determinado dia, conforme equação (4). Para a agregação do efeito dinâmico em um coeficiente simples, cada subgrupo de tratamento recebeu um peso equivalente ao seu peso na amostra. Utilizou-se o pacote em linguagem R chamado *did* de Callaway e Sant'Anna (2021) para as estimações.

O mesmo é observado para o subgrupo de radares em vias que tiveram a redução de velocidade em julho de 2015. Não parece haver diferença no volume de veículos por conta da mudança de velocidade, com resultados estatisticamente significativos apenas para às 4h e 5h (Figura 21)

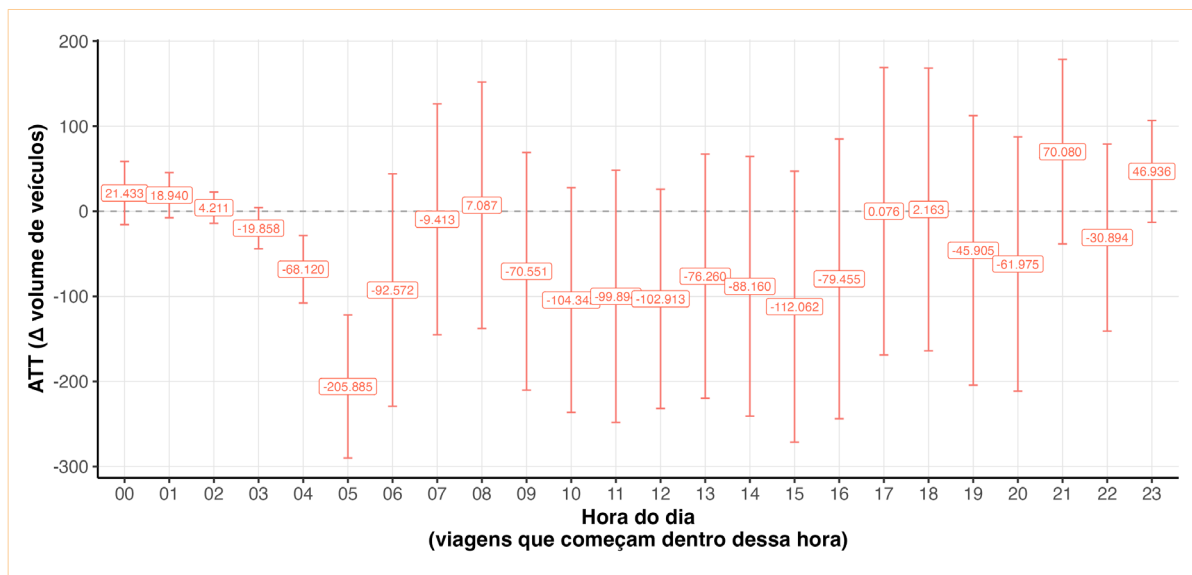


Figura 21: resultados médios por hora - volume de veículos incluindo apenas radares em vias tratadas no mês de julho.

Fonte: elaboração dos autores.

Notas: essa figura representa o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT na sigla em inglês) da agregação do estudo de eventos para cada hora em um único coeficiente médio. O grupo de controle são as rotas nunca tratadas e o grupo de tratamento inclui apenas radares em vias que tiveram alteração de velocidade no mês de julho de 2015. A variável dependente é o volume de veículos registrados num determinado horário num determinado dia, conforme equação (4). Para a agregação do efeito dinâmico em um coeficiente simples, cada subgrupo de tratamento recebeu um peso equivalente ao seu peso na amostra. Utilizou-se o pacote em linguagem R chamado *did* de Callaway e Sant'Anna (2021) para as estimações.

6.2.3 Resultados da análise de velocidades

Considerando todas as vias tratadas, a redução de velocidade é da ordem de 4 km/h nos horários da madrugada, chegando a ser de apenas 2,3 km/h no pico da tarde (18h) (Figura 22). Os resultados se mostram coerentes, visto que nos horários de pico a saturação das vias implica em uma menor variação da velocidade. Já na madrugada, o fluxo livre permite que os motoristas atinjam velocidades mais altas. Dada a redução da velocidade máxima permitida, o impacto esperado deve ser maior quanto mais livre for o fluxo.

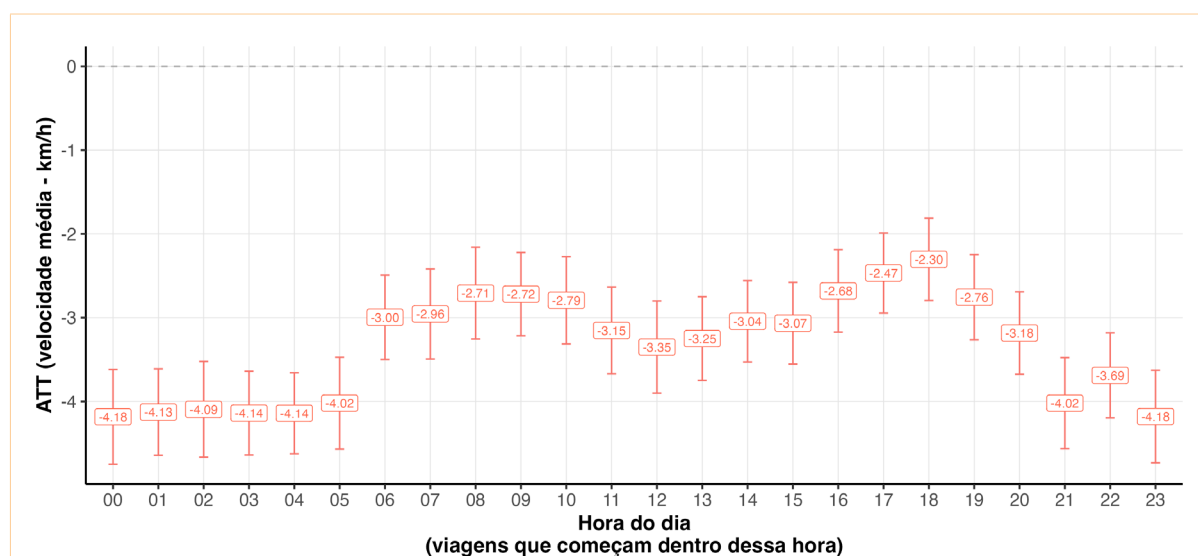


Figura 22: resultados médios por hora - velocidade média.

Fonte: elaboração dos autores.

Notas: essa figura representa o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT na sigla em inglês) da agregação do estudo de eventos para cada hora em um único coeficiente médio. O grupo de controle são as rotas nunca tratadas. A variável dependente é a velocidade pontual dos veículos média num determinado horário num determinado dia, conforme equação (4). Para a agregação do efeito dinâmico em um coeficiente simples, cada subgrupo de tratamento recebeu um peso equivalente ao seu peso na amostra. Utilizou-se o pacote em linguagem R chamado *did* de Callaway e Sant'Anna (2021) para as estimações.

De maneira análoga à seção anterior, apresenta-se a análise das diferenças da velocidade média ao longo do dia para as vias que tiveram a velocidade alterada em julho/2015 e para as demais vias, que sofreram alteração entre agosto e dezembro deste mesmo ano. A Figura 23 apresenta os resultados para a subamostra de vias com velocidade alterada após julho de 2015. É possível observar que, para todas as faixas horárias houve uma redução da velocidade média registrada, variando entre 3 e 1,5 quilômetros por hora, sendo que as maiores reduções se dão de madrugada e as menores reduções nos horários de pico.

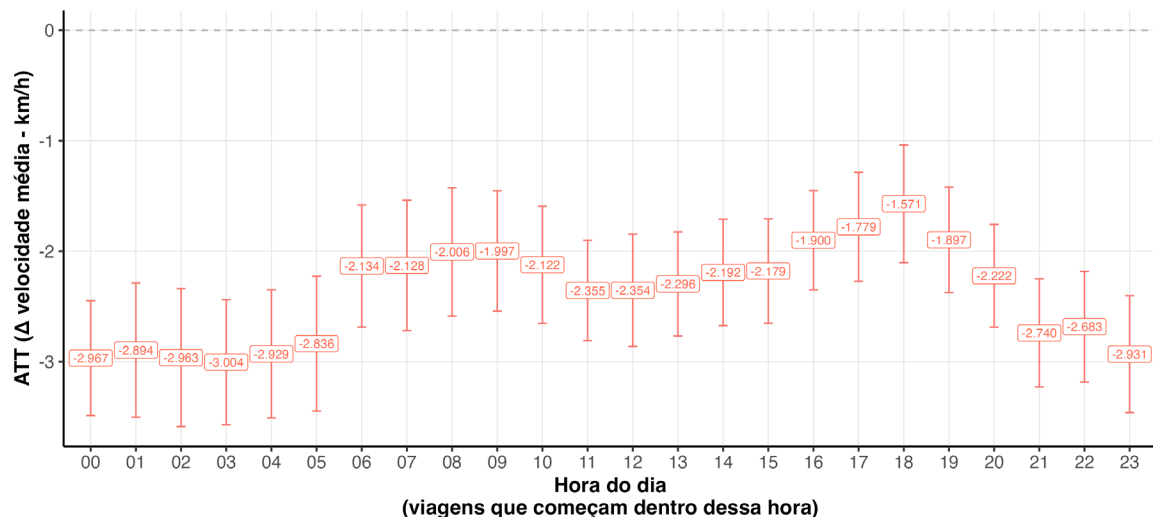


Figura 23: resultados médios por hora - velocidade média excluindo os radares em vias tratadas no mês de julho.
Fonte: elaboração dos autores.

Notas: essa figura representa o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT na sigla em inglês) da agregação do estudo de eventos para cada hora em um único coeficiente médio. O grupo de controle são as rotas nunca tratadas. O grupo de tratamento exclui as rotas tratadas no mês de julho/2015. A variável dependente é a velocidade pontual dos veículos média num determinado horário num determinado dia, conforme equação (4). Para a agregação do efeito dinâmico em um coeficiente simples, cada subgrupo de tratamento recebeu um peso equivalente ao seu peso na amostra. Utilizou-se o pacote em linguagem R chamado *did* de Callaway e Sant'Anna (2021) para as estimações.

Já para o conjunto de vias tratadas em julho de 2015, o efeito sobre a velocidade é maior (Figura 24): a redução é da ordem de 10 km/h nos horários da madrugada e oscila entre 6,3 e 7 km/h nos horários de pico.

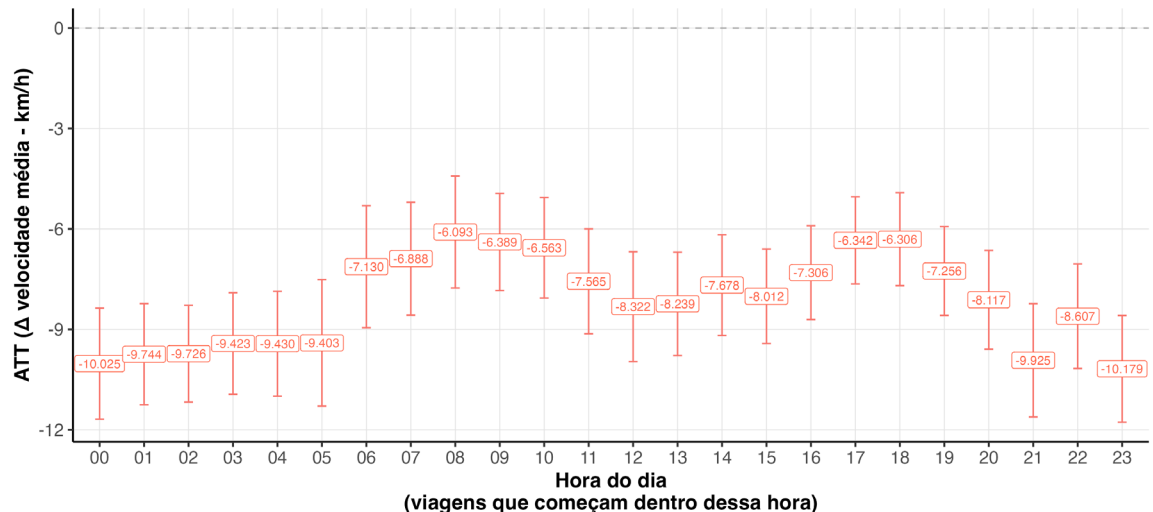


Figura 24: resultados médios por hora - velocidade média incluindo apenas os radares em vias tratadas no mês de julho.
Fonte: elaboração dos autores.

Notas: essa figura representa o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT na sigla em inglês) da agregação do estudo de eventos para cada hora em um único coeficiente médio. O grupo de controle são as rotas nunca tratadas. O grupo de tratamento inclui apenas as rotas tratadas no mês de julho/2015. A variável dependente é a velocidade pontual dos veículos média num determinado horário num determinado dia, conforme equação (4). Para a agregação do efeito dinâmico em um coeficiente simples, cada subgrupo de tratamento recebeu um peso equivalente ao seu peso na amostra. Utilizou-se o pacote em linguagem R chamado *did* de Callaway e Sant'Anna (2021) para as estimações.

6.3 Comparação entre as alterações de velocidade por tempo de viagem e por medição pontual

Duas formas distintas de mensurar a velocidade oferecem perspectivas complementares sobre o comportamento dos motoristas no trânsito. De um lado, as velocidades médias dos veículos podem ser inferidas a partir dos tempos de deslocamento entre radares (rotas). Por outro lado, pode-se usar o registro da velocidade pontual (instantânea) dos veículos para verificar suas velocidades em um determinado ponto do espaço.

No primeiro método há uma amostra mais reduzida do que no segundo, já que nem todas as placas são registradas pelos radares, e é preciso ter registros consecutivos para poder definir uma viagem. Para as medições pontuais basta apenas o registro da passagem do veículo, sendo indiferente haver ou não a identificação da placa. Por outro lado, o primeiro método traz uma visão real das mudanças de velocidades efetivamente realizadas nos trajetos dos veículos na cidade. A medida pontual pode se dar num momento de maior ou menor fluidez, não sendo efetivamente a velocidade do veículo em todo o seu trajeto. Além disso, em momentos de pouco fluxo, como nas madrugadas, motoristas podem estar trafegando acima da velocidade regulamentada, e reduzir suas velocidade nas proximidades dos equipamentos de fiscalização eletrônica justamente para não tomar uma multa. Na presença desse comportamento, as velocidades das rotas entre radares serão maiores do que as velocidades pontuais registradas.

O uso de uma ou outra métrica levaria a conclusões muito diferentes sobre o efeito da política de redução de velocidade sobre os tempos de deslocamento. Quase sempre a redução de velocidade observada na medição pontual é de maior magnitude do que a observada ao comparar-se os tempos de deslocamento (Tabela 11). Para as rotas tratadas após julho de 2015, a medição da variação de velocidade a partir das velocidades médias gera valores inferiores a 1 km/h, enquanto as velocidades pontuais informam variações de mais de 2 km/h. Essa diferença também costuma existir para as rotas tratadas no mês de julho de 2015, em que a diferença entre as duas variações chegam a ser até 4,5 vezes, com as velocidades pontuais sofrendo as maiores quedas na maior parte dos casos.

Tabela 11: Comparação da variação da velocidade média considerando tempos de deslocamento ou velocidades pontuais.

Hora	Variação na velocidade média (km/h)			
	Rotas tratadas após 07/2015		Apenas rotas tratadas em 07/2015	
	Tempos de deslocamento	Velocidade pontual	Tempos de deslocamento	Velocidade pontual
0	-0.96	-2.97	-6.24	-10.02
1	-0.11	-2.89	-5.20	-9.74
2	-0.99	-2.96	-9.66	-9.73
3	-1.07	-3.00	-10.83	-9.42
4	-0.45	-2.93	-7.16	-9.43
5	-0.16	-2.84	-4.91	-9.40
6	0.42	-2.13	-2.70	-7.13
7	-0.01	-2.13	-3.77	-6.89
8	-0.61	-2.01	-5.98	-6.09
9	-0.57	-2.00	-7.09	-6.39
10	-0.57	-2.12	-7.43	-6.56
11	-0.49	-2.35	-6.39	-7.57
12	-0.39	-2.35	-4.68	-8.32
13	-0.38	-2.30	-4.09	-8.24
14	-0.31	-2.19	-1.69	-7.68
15	-0.30	-2.18	-2.19	-8.01
16	-0.02	-1.90	-3.53	-7.31
17	-0.07	-1.78	-4.08	-6.34
18	-0.26	-1.57	-4.67	-6.31
19	-0.76	-1.90	-7.91	-7.26
20	-0.73	-2.22	-7.14	-8.12
21	-0.35	-2.74	-4.46	-9.92
22	-0.66	-2.68	-5.34	-8.61
23	-0.46	-2.93	-7.94	-10.18
Fonte: elaboração dos autores.				

6.4 Análise da supersaturação e homogeneização do tráfego

6.4.1 Definição do estado de supersaturação em cada radar

Para a análise de supersaturação e homogeneização do tráfego, utilizou-se o mesmo conjunto de dados descrito na Seção 5.1.2 Radares. Uma limitação dos dados brutos é que eles não indicam se, no momento do registro em cada radar, o nível de serviço da via indicava algum tipo de supersaturação. Portanto, a primeira etapa da análise consistiu na classificação de cada registro dos radares em termos do estado de saturação da via: o trânsito estava em condições normais ou de supersaturação.

Para isso, foi utilizada a relação fundamental do tráfego para definir a velocidade a partir da qual a via passou a um estado de supersaturação. A curva da relação volume versus veloci-

dade pode ser aproximada por uma parábola, ou seja, em que o volume está no Y e a velocidade no eixo X. Nesse caso, a relação entre ambas as variáveis se assemelha a uma equação de segundo grau, em que é possível identificar a velocidade em que a via atinge o volume máximo, ou seja, a sua capacidade (Equação 5).

$$volume_i = \alpha + \beta_1 velocidade_i + \beta_2 velocidade_i^2 + \varepsilon_i \quad (5)$$

Onde β_2 deve ser negativo. Os coeficientes β_1 e β_2 foram estimados para cada radar, agrupando todas as horas do dia entre 6 da manhã e 10 da noite. Para o grupo de controle, utilizaram-se todos os dados entre 01/01/2015, e 31/12/2016. Para o grupo de tratamento, foi estimada uma equação para antes da mudança de velocidade e outra para depois.

A partir da extração de derivadas de primeira ordem da Equação 5, estimou-se a velocidade equivalente do ponto em que o volume de veículos atinge a capacidade da via. Nesse contexto, a classificação dos veículos trafegando em uma situação de supersaturação ou não é dada pelo seguinte: veículos cuja velocidade registrada é menor que a velocidade equivalente indicam o um estado de supersaturação, ou seja, o veículo está trafegando a uma velocidade mais baixa porque a via está congestionada (supersaturada). Já veículos cuja velocidade registrada é maior que a velocidade equivalente estão trafegando em uma situação de volume de tráfego abaixo da capacidade, e portanto, a via não está congestionada.

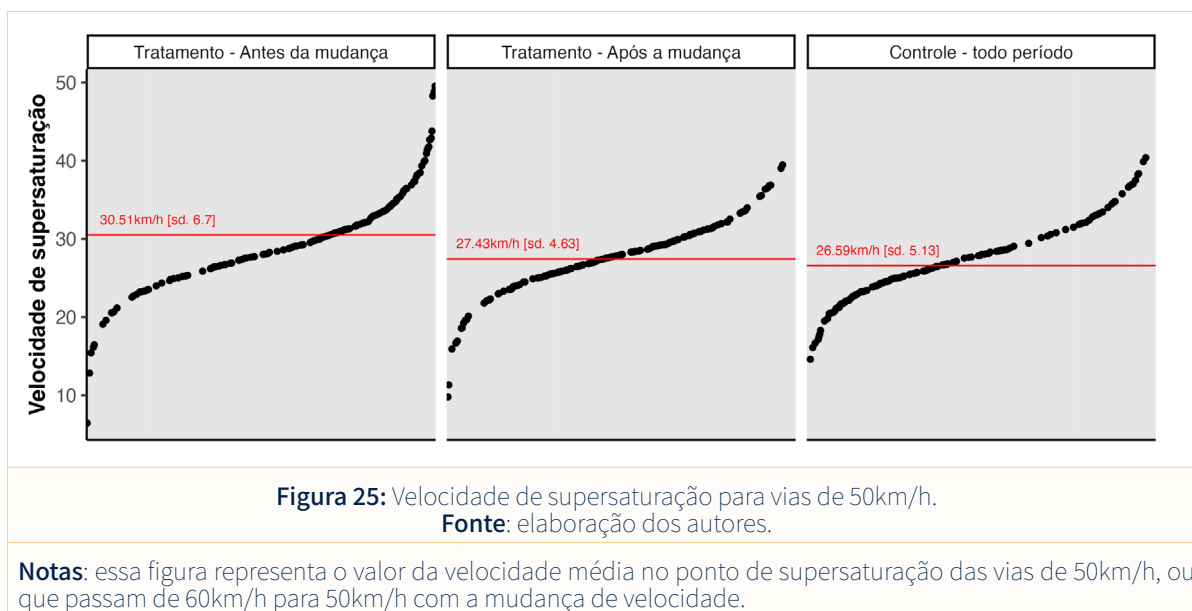
Esse modelo foi estimado para os 646 radares da amostra. Porém, 15 deles apresentaram resultados inconsistentes, muito provavelmente porque existem vias que nunca entram em estado de supersaturação, ou seja, o volume máximo não excede a capacidade da via. Com isso, a amostra para essa análise conta com 631 radares, 270 no grupo de tratamento e 361 no grupo de controle.

Conforme discutido na Seção 4.4, a partir da relação fundamental do tráfego é possível derivar matematicamente que a velocidade na qual a via atinge sua capacidade máxima é metade da velocidade máxima. Então, se há uma redução da velocidade máxima, espera-se que também haja uma queda no ponto de supersaturação.

Os dados empíricos extraídos dos radares sustentam a previsão teórico-matemática de que o ponto de saturação acontece quando os veículos trafegam a metade da velocidade máxima da via. A Figura 25 apresenta uma análise da parcela de vias da cidade que tiveram suas velocidades máximas permitidas diminuídas de 60 km/h para 50 km/h para no caso do grupo de tratamento e das vias que possuem velocidade máxima de 50 km/h e são do grupo de controle.

É possível observar que a média da velocidade de saturação do grupo de controle é de 26,59 km/h, muito próxima de 25 km/h (valor previsto teoricamente). Já nas observações do grupo de tratamento, observa-se que no período anterior à readequação das velocidades máximas, a velocidade de supersaturação era igual a 30,51 km/h, também metade da velocidade máxima de 60 km/h, em linha com a previsão teórica. Após terem recebido o tratamento, a média de velocidade de supersaturação também oscilou para baixo, ajustando-se à metade da nova velocidade máxima permitida.

Ainda é possível observar que, quando a velocidade regulamentada é mais alta (60 km/h), há uma maior variabilidade da velocidade de saturação, segundo o desvio padrão (s.d. 6,7 km/h), quando comparado com a variabilidade quando as vias possuem uma velocidade máxima permitida menor (50 km/h, por exemplo). A variabilidade no grupo de tratamento observada foi de 6,63 km/h e do grupo de controle de 5,13 km/h.



Dadas as velocidades em que ocorrem a supersaturação, as vias foram classificadas em estados de “supersaturação” ou “fluxo normal” a partir do volume total de veículos e a velocidade média de cada radar em intervalos a cada 5 minutos. A partir dessa classificação, foram estimadas duas probabilidades ao longo do dia. Primeiro, a probabilidade de supersaturação em cada faixa horária do dia, dada pela razão entre o número de intervalos de 5 minutos supersaturados naquela hora e o número de intervalos de 5 minutos monitorados naquela hora. A segunda probabilidade de supersaturação no dia, dada pela razão entre o número de intervalos de 5 minutos supersaturados no dia e o número total de intervalos de 5 minutos monitorados no dia.

6.4.2 Resultados da análise de supersaturação

Em relação à análise do dia inteiro, os resultados apresentam uma redução estatisticamente significativa da probabilidade de supersaturação nas vias que sofreram redução de velocidade. A Figura 26 demonstra que as vias que receberam o tratamento apresentaram uma redução de 0,05 pontos percentuais na probabilidade de apresentar supersaturação ao longo do dia. O efeito observado no mês zero decorre do fato de o mês inteiro ter sido classificado como “antes da mudança”, ainda que a alteração de velocidade tenha ocorrido no dia 20, por exemplo, fazendo com que o restante do mês já correspondesse ao período “tratado”.

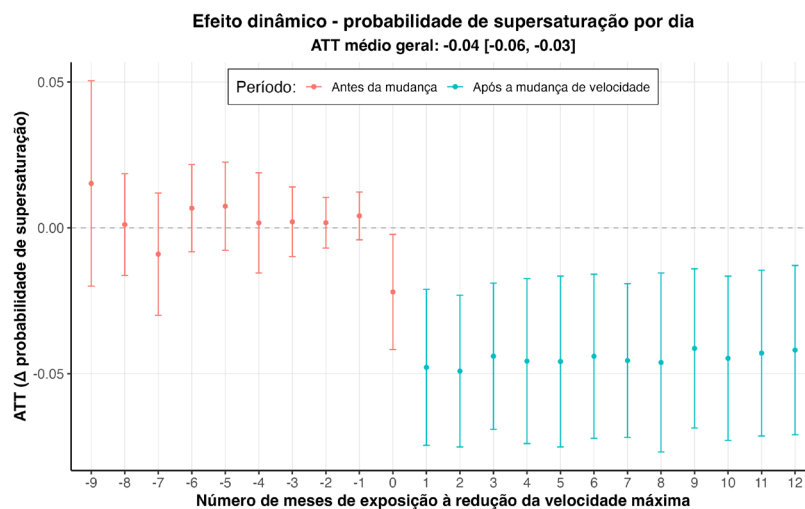


Figura 26: estudo de eventos para todos os subgrupos de tratamento - probabilidade de supersaturação.
Fonte: elaboração dos autores.

Notas: essas figuras representam o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT na sigla em inglês) do estudo de eventos para cada dia. A variável dependente é a probabilidade diária de supersaturação em cada radar, conforme equação (4). Para a agregação do efeito dinâmico em um coeficiente simples e único para cada mês de exposição, cada subgrupo de tratamento recebeu um peso equivalente ao seu peso na amostra. O grupo de controle são os radares nunca tratados. Utilizou-se o pacote em linguagem R chamado *did* de Callaway e Sant'Anna (2021) para as estimações.

Já em relação à análise da probabilidade de supersaturação ao longo do dia nas vias que receberam tratamento (Figura 27), observa-se que o efeito da redução é menor nas horas de menor fluxo de veículos, como na madrugada ou no entropico, e maior nos picos da manhã e da tarde. Esses resultados evidenciam que a política de redução de velocidades, ao contrário dos argumentos utilizados contra essas medidas, tem uma parcela de contribuição na diminuição na probabilidade de ocorrência de congestionamentos, ou supersaturação, particularmente nos horários de pico. Muito provavelmente, isso se deve ao fato de que menores velocidades aumentam a fluidez do tráfego ao permitir que os motoristas tenham maior espaço para manobra.

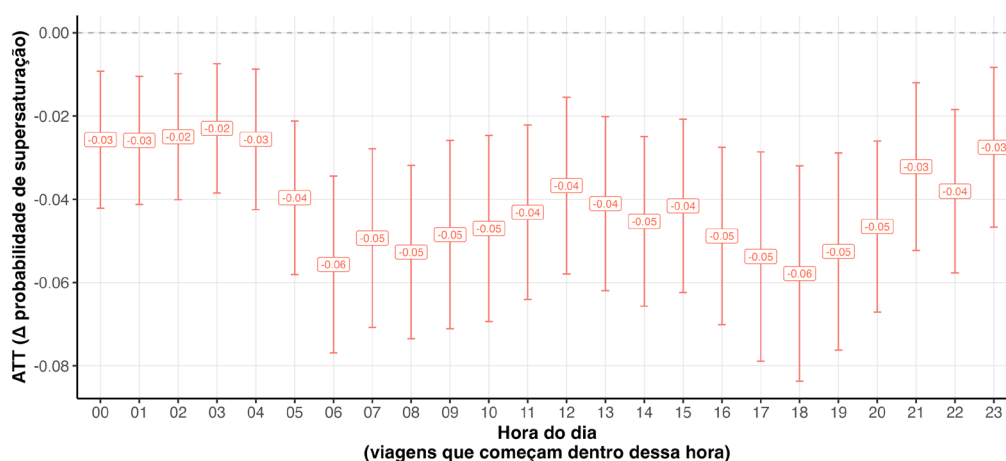


Figura 27: resultados médios por hora - probabilidade de supersaturação.
Fonte: elaboração dos autores.

Notas: essas figuras representam o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT na sigla em inglês) do estudo de eventos para cada dia. A variável dependente é a probabilidade diária de supersaturação em cada radar, conforme equação (4). Para a agregação do efeito dinâmico em um coeficiente simples e único para cada mês de exposição, cada subgrupo de tratamento recebeu um peso equivalente ao seu peso na amostra. O grupo de controle são os radares nunca tratados. Utilizou-se o pacote em linguagem R chamado *did* de Callaway e Sant'Anna (2021) para as estimações.

É importante notar que a exposição à política pelos usuários exerce influência nos resultados. A Figura 29 mostra que o efeito para a subamostra que sofreu tratamento após julho/2015 não é apenas menor que o experimentado pelo subamostra de vias tratadas em julho/2015 (Figura 30), mas também mais homogêneo. A subamostra que recebeu o tratamento após julho/2015 apresenta um efeito de redução praticamente constante na probabilidade de supersaturação entre 6h e 20h: 0,05 pontos percentuais (Figura 28). Para as demais horas, esse efeito oscila entre uma redução de 0,02 e 0,03 pontos percentuais.

Já nos resultados do subgrupo de radares em vias tratadas no mês de julho de 2015, quando a política foi amplamente implementada pela primeira vez, há uma maior variabilidade em relação à probabilidade de supersaturação (Figura 29). Para as horas da madrugada ou do entropico, não se nota uma redução na probabilidade de supersaturação. Essa redução só existe no pico da manhã e da tarde, chegando até a uma redução de 0,07 pontos percentuais.

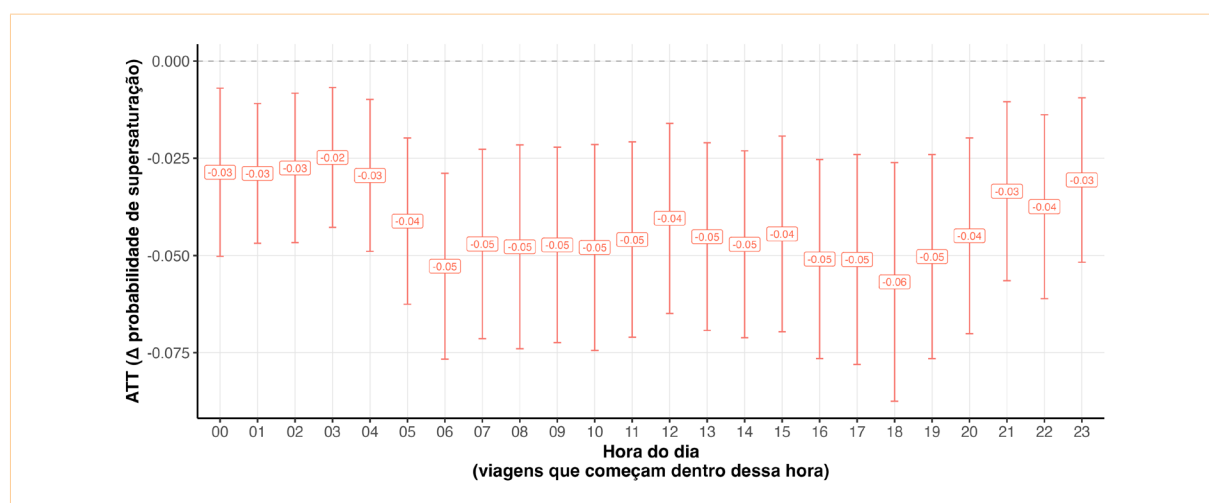


Figura 28: resultados médios por hora - probabilidade de supersaturação excluindo radares em vias tratadas no mês de julho. | **Fonte:** elaboração dos autores.

Notas: essas figuras representam o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT na sigla em inglês) do estudo de eventos para cada dia. A variável dependente é a probabilidade diária de supersaturação em cada radar, conforme equação (4). Para a agregação do efeito dinâmico em um coeficiente simples e único para cada mês de exposição, cada subgrupo de tratamento recebeu um peso equivalente ao seu peso na amostra. O grupo de controle são os radares nunca tratados. Utilizou-se o pacote em linguagem R chamado *did* de Callaway e Sant'Anna (2021) para as estimações.

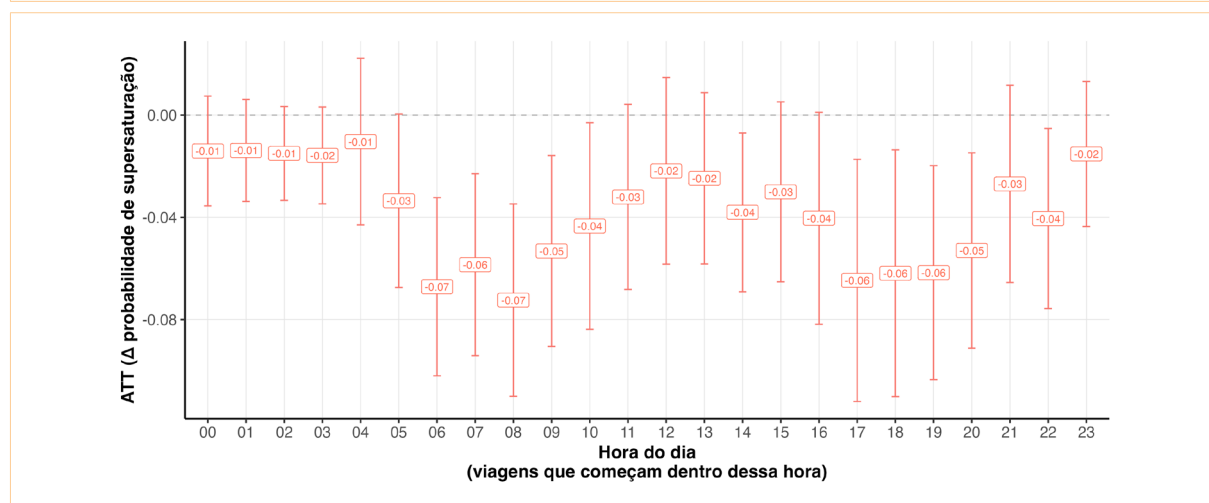


Figura 29: resultados médios por hora - probabilidade de supersaturação incluindo apenas radares em vias tratadas no mês de julho. | **Fonte:** elaboração dos autores.

Notas: essas figuras representam o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT na sigla em inglês) do estudo de eventos para cada dia. A variável dependente é a probabilidade diária de supersaturação em cada radar, conforme equação (4). Para a agregação do efeito dinâmico em um coeficiente simples e único para cada mês de exposição, cada subgrupo de tratamento recebeu um peso equivalente ao seu peso na amostra. O grupo de controle são os radares nunca tratados. Utilizou-se o pacote em linguagem R chamado *did* de Callaway e Sant'Anna (2021) para as estimações.

Essa diferença de padrão pode estar associada ao caráter inédito da política naquele momento inicial, que gerou respostas heterogêneas dos usuários. Já nos subgrupos tratados posteriormente, é possível que os condutores estivessem mais familiarizados com a política, seja por experiência direta ou indireta, resultando em um comportamento mais uniforme e previsível. Além disso, a política provavelmente já se encontrava em um estágio mais consolidado, com maior efetividade na comunicação e fiscalização, o que pode ter contribuído para os efeitos mais consistentes ao longo do dia.

Uma segunda razão a ser explorada sobre a diferença nesse padrão pode estar relacionada às características físicas das vias que receberam tratamento em julho/2015 das que receberam o tratamento entre agosto e dezembro deste mesmo ano. Isso porque as vias que receberam o tratamento em um primeiro momento são majoritariamente de trânsito rápido, como as marginais Pinheiros e Tietê. Essas vias se caracterizam por terem menos interrupções causadas por entrada e saída de veículos dos lotes lindeiros e sinalização semafórica ou em nível. Isso pode levar a uma maior sensibilidade no efeito da implantação da política, visto que essas vias possuem menos interferência de outros aspectos da configuração viária.

6.4.3 Resultados da análise de homogeneização do tráfego

Para a análise da homogeneização do tráfego, utilizou-se o conceito fator de pico-horário (FPH), conforme definido na equação (1). Nessa análise, foram utilizados dados para 646 radares, conforme explicação da Seção 5.1.2 Radares.

O fator hora-pico é dado pela razão entre o volume total de veículos em uma hora e multiplicação dos 15 minutos mais movimentados por quatro. Assim, quanto mais próximo de 1, mais homogêneo é o volume de veículos que passam na seção durante qualquer período de 1h. Embora esse fator seja utilizado para outros propósitos, sua ideia original é utilizada para as análises sobre a homogeneização do tráfego. Quanto mais distante de 1, o FPH demonstra que em uma mesma faixa horária apresenta muita variação no fluxo de veículos.

Trafegar em velocidades mais baixas permite que os motoristas aumentem seu campo de visão e tenham maior espaço e tempo para fazer manobras, de modo que a interação entre veículos se torna mais orgânica, com menos ruídos nos movimentos cinemáticos. Ou seja, menores velocidades de condução tendem a resultar em um tráfego mais homogêneo.

No caso das políticas de redução de velocidade, espera-se que o tráfego se torne mais homogêneo, de forma que é esperado um aumento no FPH para os radares em vias tratadas em relação a radares em vias controle. A análise dos dados empíricos mostra que, de fato, as vias tratadas observam um aumento no FPH. Novamente, o efeito é mais proeminente nos horários de pico e no entropico do que nas horas da madrugada, quando o efeito é estatisticamente não significativo (Figura 30).

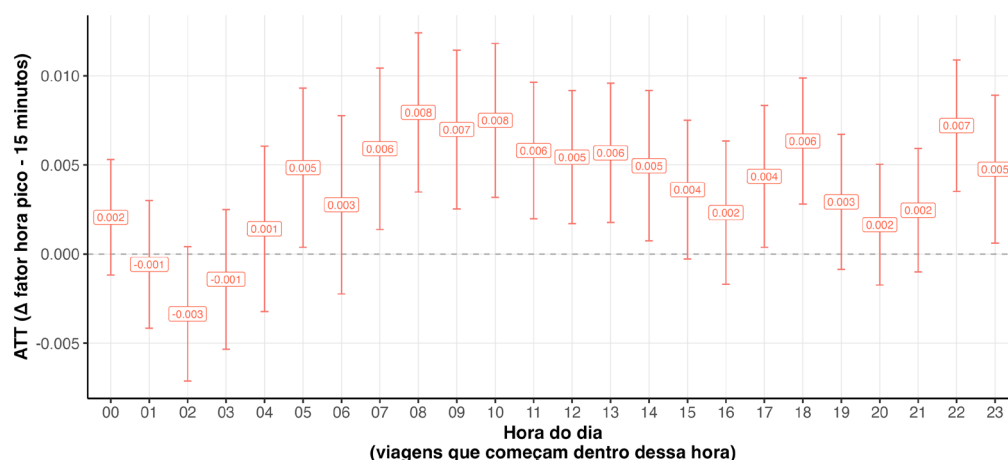


Figura 30: resultados médios por hora - fator pico-horário.

Fonte: elaboração dos autores.

Notas: essas figuras representam o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT na sigla em inglês) do estudo de eventos para cada dia. A variável dependente é a probabilidade diária de supersaturação em cada radar, conforme equação (4). Para a agregação do efeito dinâmico em um coeficiente simples e único para cada mês de exposição, cada subgrupo de tratamento recebeu um peso equivalente ao seu peso na amostra. O grupo de controle são os radares nunca tratados. Utilizou-se o pacote em linguagem R chamado *did* de Callaway e Sant'Anna (2021) para as estimações.

De modo semelhante, as análises também foram separadas para os subgrupos que receberam tratamento no mês de julho/2015 e após julho/2015, para avaliar o efeito do tempo da política no comportamento dos usuários. Para o segundo grupo (Figura 31), o efeito é majoritariamente não significativo, existindo apenas no pico da manhã e no início do pico da tarde (18h).

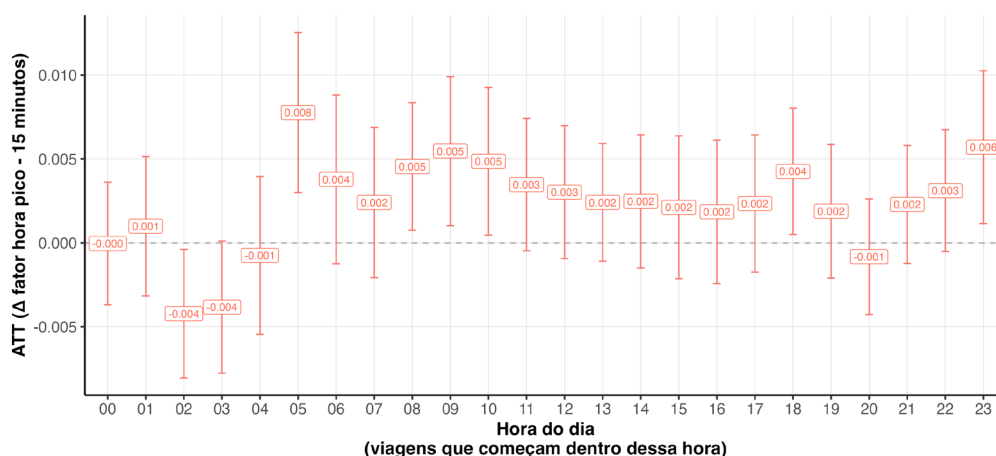


Figura 31: resultados médios por hora - fator pico-horário excluindo radares em vias tratadas no mês de julho.

Fonte: elaboração dos autores.

Notas: essas figuras representam o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT na sigla em inglês) do estudo de eventos para cada dia. A variável dependente é a probabilidade diária de supersaturação em cada radar, conforme equação (4). Para a agregação do efeito dinâmico em um coeficiente simples e único para cada mês de exposição, cada subgrupo de tratamento recebeu um peso equivalente ao seu peso na amostra. O grupo de controle são os radares nunca tratados. Utilizou-se o pacote em linguagem R chamado *did* de Callaway e Sant'Anna (2021) para as estimações.

Para o subgrupo de radares em vias que receberam a mudança de velocidade em julho de 2015 (Figura 32), o efeito é mais forte, e quase sempre significativo entre 07h e 22h. Assim, pode-se dizer que o efeito geral é, em grande parte, explicado pelo efeito desse subgrupo.

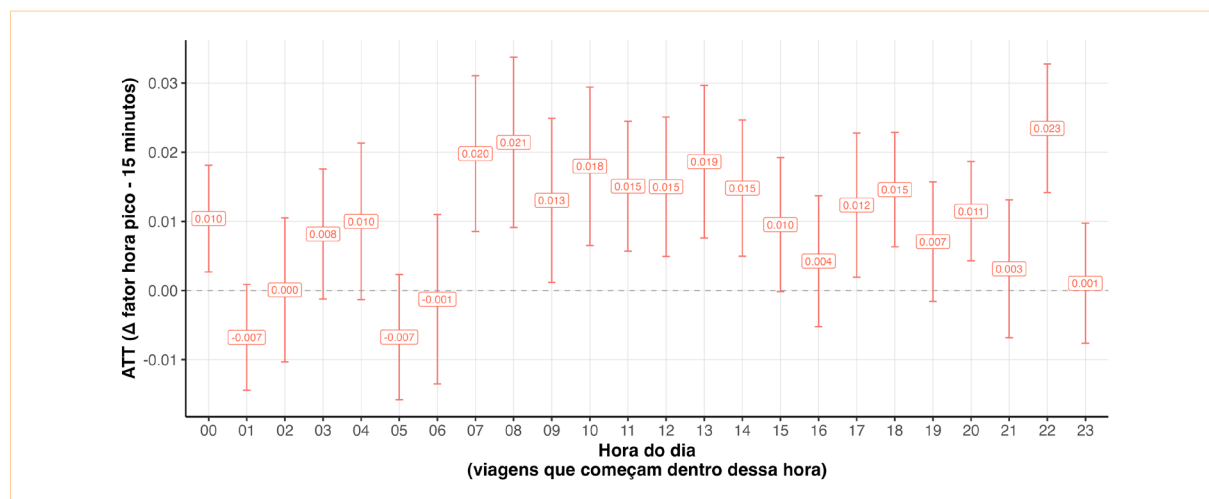


Figura 32: resultados médios por hora - fator pico-horário incluindo apenas radares em vias tratadas no mês de julho.

Fonte: elaboração dos autores.

Notas: essas figuras representam o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT na sigla em inglês) do estudo de eventos para cada dia. A variável dependente é a probabilidade diária de supersaturação em cada radar, conforme equação (4). Para a agregação do efeito dinâmico em um coeficiente simples e único para cada mês de exposição, cada subgrupo de tratamento recebeu um peso equivalente ao seu peso na amostra. O grupo de controle são os radares nunca tratados. Utilizou-se o pacote em linguagem R chamado *did* de Callaway e Sant'Anna (2021) para as estimações.

Conclusões

Os resultados apresentados nesta pesquisa apontam para um conjunto de efeitos relevantes decorrentes da política de redução dos limites de velocidade na cidade de São Paulo, implementada no curso do ano de 2015. Ao longo da análise, foi possível avaliar o impacto dessa política sobre diferentes aspectos da circulação viária, utilizando para tanto os dados provenientes dos equipamentos de fiscalização eletrônica organizados de duas maneiras: tempos de viagem nas rotas entre radares, e medidas instantâneas no local da fiscalização eletrônica. Analisou-se, portanto, os tempos de viagens entre radares, velocidades e volumes pontuais, probabilidade de supersaturação e homogeneidade dos fluxos ao longo do dia em cada equipamento.

Em relação aos efeitos da política nos tempos de viagem, observa-se que no resultado geral, considerando todas as vias tratadas, todas as faixas horárias do dia apresentaram um aumento estatisticamente significativo nos tempos de viagem, medidos em seg/km. Embora o período da madrugada tenha sofrido um efeito mais relevante na velocidade média (às 3h, queda de 3,39 km/h), os efeitos de maior impacto relativo em termos de tempo de viagem ocorreram no final do pico da manhã. Todavia, é possível que os usuários não tenham percebido esse impacto devido à baixa magnitude do aumento dos tempos de viagem. Por exemplo, às 9h, observou-se um acréscimo de 23,4 seg/km. Isso significa que em uma viagem de 5 km, houve um aumento de apenas 1 minuto e 57 segundos no tempo total de viagem que no período anterior à mudança era de 15 minutos e meio.

Ao isolar o potencial efeito de composição por meio da exclusão dos radares tratados no mês de julho/2015 (49,6% da amostra), os resultados mostram que o efeito da política no aumento do tempo de viagem deixa de ser estatisticamente significativo em muitas faixas horárias. Além disso, a magnitude dos impactos são significativamente mais baixas. Na faixa horária com o maior efeito, 8h, por exemplo, observou-se um aumento de apenas 8,5 seg/km. Para viagens de 5 km, isso significa um aumento de 42,5 segundos em uma viagem que durava em média 18 minutos e meio, quase imperceptível para os usuários comuns.

É importante considerar que os impactos médios nos deslocamentos diários dos paulistanos tendem a ser menores do que os estimados nesta análise. Isso porque foram consideradas apenas rotas cuja extensão completa foi afetada pela política, o que representa um cenário de máxima exposição. Na prática, a maioria dos deslocamentos urbanos é composta por segmentos tratados e não tratados. Portanto, os efeitos observados sobre os tempos de viagem devem ser interpretados como um limite superior — ou seja, o pior cenário possível dentro do conjunto de rotas de fato utilizadas pelas pessoas em São Paulo.

Uma comparação entre os resultados das alterações de velocidades médias e pontuais revela diferenças importantes. A utilização da medição da velocidade instantânea dos veículos para analisar os efeitos da redução das velocidades levaria à conclusão de que o aumento nos tempos de deslocamento (redução das velocidades pontuais) é muito maior do que o observado usando os tempos de viagem entre pares de radares (redução das velocidades médias). Durante a madrugada, essa discrepância tende a ser maior, o que pode refletir o hábito dos motoristas de frear ao se aproximarem dos radares a fim de evitar autuações por excesso de velocidade. Esse resultado reforça a importância da fiscalização baseada em velocidade média para garantir o cumprimento dos limites estabelecidos nas vias.

A análise das medições pontuais permite, além das velocidades, observar os fluxos de veículos. Os resultados mostram que não houve variação estatisticamente significativa nos volumes de tráfego após a implementação da política. Isso indica que as vias que receberam o tratamento das políticas de redução de velocidades não perderam a atratividade e é muito provável que os usuários não tenham buscado caminhos alternativos como resposta direta à nova regulamentação. Em outras palavras, a política pode até ter gerado efeito de fuga ou provocado a redistribuição de usuários entre vias, mas em termos gerais, o comportamento do tráfego se manteve, o que fortalece a interpretação de que seus efeitos ocorrem majoritariamente sobre o comportamento dos motoristas e não sobre a macroestrutura do fluxos na rede viária.

Quanto à probabilidade de supersaturação, observa-se uma redução estatisticamente significativa na probabilidade de supersaturação durante os horários de pico, bem como um aumento da homogeneidade dos fluxos entre 7h e 22h, particularmente nos horários de pico. Ainda que os efeitos sejam pequenos, juntos, eles apontam para um trânsito mais fluido e previsível. Mesmo que os tempos de viagem tenham aumentado, esse acréscimo pode ser compensado pela maior certeza em relação ao tempo total necessário para se deslocar - uma variável muitas vezes negligenciada, mas com forte influência sobre o comportamento dos usuários. A imprevisibilidade nos deslocamentos impõe custos indiretos, como a necessidade de sair com antecedência excessiva para garantir a pontualidade, o que pode afetar a produtividade e o bem-estar dos cidadãos. Todavia, é importante ressaltar que a magnitude dessas probabilidades é muito baixa, todas inferiores a 1 ponto percentual de redução. O efeito de homogeneização dos fluxos também se manifesta de maneira mais clara nos horários de pico, sugerindo que a redução de velocidade pode contribuir para uma circulação mais estável e menos sujeita a variações abruptas, ainda que esse efeito tenha uma magnitude muito pequena.

Em síntese, a política de redução de velocidades aplicada no curso do segundo semestre de 2015 produziu efeitos muito modestos no comportamento de tráfego da cidade de São Paulo até dezembro de 2016. As vias mantiveram sua atratividade, com volumes de veículos semelhantes aos observados anteriormente; a probabilidade de supersaturação e homogeneização apresentou apenas uma melhora marginal; e os efeitos sobre as velocidades - e, consequentemente, sobre os tempos de viagem - mostraram-se de baixa magnitude, praticamente imperceptíveis para a maioria dos usuários ao longo do dia. A discrepância entre os resultados obtidos a partir das velocidades médias e das velocidades pontuais sugere, por sua vez, um comportamento de frenagem próximo aos equipamentos de fiscalização, o que reforça a relevância de mecanismos de controle por velocidade média para assegurar o cumprimento efetivo dos limites regulamentados.

Mesmo com algumas limitações metodológicas, os resultados indicam que, ao reduzir os picos de supersaturação e aumentar a previsibilidade dos deslocamentos, a medida pode contribuir para uma melhoria da experiência de mobilidade urbana. Futuras investigações, contudo, poderiam explorar de forma mais direta os efeitos sobre a percepção dos usuários quanto à qualidade do deslocamento, bem como as razões da resistência social a essas medidas e o peso político associado à sua adoção pelos tomadores de decisão.

Referências Bibliográficas

AMANCIO, Eduardo Cesar. **INFLUÊNCIA DE DISPOSITIVOS DE FISCALIZAÇÃO ELETRÔNICA DE VELOCIDADE NO COMPORTAMENTO DO CONDUTOR EM CENÁRIO URBANO**. 2021. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

ANG, Amanda; CHRISTENSEN, Peter; VIEIRA, Renato. Should congested cities reduce their speed limits? Evidence from São Paulo, Brazil. **Journal of public economics**, v. 184, n. 104155, p. 104155, 2020.

Archer, J., Fotheringham, N., Symmons, M., & Corben, B. (2008). The impact of lowered speed limits in urban/metropolitan areas (No. 276). Disponível em: https://docs.google.com/document/d/14f3_8SI2dXUm3XNWYkPCDklQlvZflCVAIWPRRz5XsDo/edit?tab=t.0 Acesso em: 31 out. 2025

BAUERNSCHUSTER, Stefan; REKERS, Ramona. Speed limit enforcement and road safety. **Journal of public economics**, v. 210, n. 104663, p. 104663, 2022.

CICLOCIDADE, Associação dos Ciclistas Urbanos de São Paulo. Fiscalização por velocidade média: potenciais para a implementação a partir de dados empíricos da cidade de São Paulo. São Paulo: Ciclocidade, 2024

CLOUTIER, Marie-Soleil; LACHAPELLE, Ugo. The effect of speed reductions on collisions: A controlled before-and-after study in quebec, Canada. **Journal of transport & health**, v. 22, n. 101137, p. 101137, 2021.

FOLGERØ, Ingrid Kristine; HARDING, Torfinn; WESTBY, Benjamin S. Going fast or going green? Evidence from environmental speed limits in Norway. **Transportation research. Part D, Transport and environment**, v. 82, n. 102261, p. 102261, 2020.

FONDZENYUY, Stephen Kome et al. The impact of speed limit change on emissions: A systematic review of literature. **Sustainability**, v. 16, n. 17, p. 7712, 2024.

ISAKSSON-HELLMAN, Irene; TÖREKI, Josefin. The effect of speed limit reductions in urban areas on cyclists' injuries in collisions with cars. **Traffic injury prevention**, v. 20, n. sup3, p. 39–44, 2019.

JANG, Sunhee et al. Impact of lowering speed limit on urban transportation network. **Applied sciences (Basel, Switzerland)**, v. 12, n. 11, p. 5296, 2022.

Lessons from the republic of Korea's recent move to lower speed limit on urban roads. Disponível em: <<https://www.globalroadsafetyfacility.org/sites/default/files/2023-10/Do->

ROESS, Roger R.; PRASSAS, Elena S.; MCSHANE, William R.. **Traffic Engineering**. 5. ed. Nova York: Pearson, 2021.

Speed-Limit-Reductions-Help-Road-Safety-Lessons-from-the-Republic-of-Koreas-Recent-Move-to-Lower-Speed-Limit-on-Urban-Roads.pdf>. Acesso em: 31 out. 2025.

MAHER, Mike. **20mph Research Study**. Londres: Atkins, 2018. Disponível em : <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5bf2ba08ed915d1830158998/20mph-technical-report.pdf> Acesso em : 31out. 2025

METCALFE, Jayne. **The effect of speed on emissions: summary report**. Disponível em: <<https://at.govt.nz/media/1992225/the-effect-of-speed-on-emissions-summary-report.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2025.

SÃO PAULO (Município). **Plano de Segurança Viária do Município de São Paulo**, 2019. 248 p. Disponível em: https://drive.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/chamadas/plano_de_segurana_viaria_pmsp_2019_web_1558984227.pdf Acesso em: 31 out. 2025.

SÃO PAULO. **Boletim Técnico 5: noções básicas de engenharia de tráfego**. São Paulo: Companhia Engenharia de Tráfego, 1977. 120 p.

SORIGUERA, Francesc et al. Effects of low speed limits on freeway traffic flow. **Transportation research. Part C, Emerging technologies**, v. 77, p. 257–274, 2017.

VAN GOEVERDEN, Cornelis Dirk. The value of travel speed. **Transportation research interdisciplinary perspectives**, v. 13, n. 100530, p. 100530, 2022.

VAN SCHAGEN, Ingrid et al. Monitoring speed before and during a speed publicity campaign. **Accident; analysis and prevention**, v. 97, p. 326–334, 2016.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Global status report on road safety 2023**. Genebra, Switzerland: World Health Organization, 2023.

YANNIS, George; MICHELARAKI, Eva. Review of City-Wide 30 km/h Speed Limit Benefits in Europe. **Sustainability**, v. 16, n. 11, p. 4382, 2024.

Nunes et al. EFEITO DA REDUÇÃO DO LIMITE DE VELOCIDADE NO TEMPO MÉDIO DE VIAGEM - ESTUDO DE CASO DE FORTALEZA. In: ANAIS DO CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2022, Fortaleza. Anais eletrônicos..., Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/anpet/anpet-2022/trabalhos/efeito-da-reducao-do-limite-de-velocidade-no-tempo-medio-de-viagem-estudo-de-cas?lang=pt-br>> Acesso em: 31 Out. 2025.

Apêndice

A1. Resultados de tempos de deslocamento para as rotas tratadas em julho de 2015

A análise considerando apenas as rotas tratadas no mês 7 indica que a maior parte do efeito geral provém desse subgrupo. Ainda que a magnitude da variação seja maior, o padrão anterior se mantém: a variação no tempo de deslocamento é maior nas horas de pico e entre pico do que na madrugada. O maior efeito se dá às 9h, com um aumento de 39 seg/km nos tempos de deslocamento, ou um total de 3 minutos e 17 segundos em uma viagem de 5 km. O menor efeito ocorre à 1h, com um acréscimo de 8,6 seg/km, ou um total de 43 segundos em uma viagem de 5 km.

Tabela A1: resultados médios por hora apenas para as rotas tratadas no mês 07/2015.

Hora	Antes da mudança de velocidade		Variação após a mudança de velocidade		
	Velocidade média (km/h)	Tempo de deslocamento (seg/km)	Velocidade média (km/h)	Tempo de deslocamento (seg/km)	Velocidade percentual
0	47.58	75.66	-6.24	11.41	15.08% *
1	49.28	73.05	-5.20	8.62	11.79% *
2	48.13	74.80	-9.66	18.79	25.13% *
3	43.46	82.83	-10.83	27.50	33.20% *
4	33.88	106.25	-7.16	28.46	26.79% *
5	28.96	124.29	-4.91	25.39	20.43% *
6	26.75	134.59	-2.70	15.10	11.22% *
7	26.77	134.48	-3.77	22.03	16.38% *
8	27.43	131.25	-5.98	36.61	27.89% *
9	29.23	123.15	-7.09	39.42	32.01% *
10	30.60	117.63	-7.43	37.70	32.05% *
11	30.64	117.51	-6.39	30.94	26.33% *
12	29.85	120.59	-4.68	22.41	18.58% *
13	29.20	123.29	-4.09	20.08	16.29% *
14	26.48	135.96	-1.69	9.29	6.83% *
15	25.88	139.12	-2.19	12.83	9.22% *
16	25.04	143.77	-3.53	23.57	16.40% *
17	28.16	127.82	-4.08	21.65	16.94% *
18	31.97	112.60	-4.67	19.25	17.10% *
19	37.28	96.56	-7.91	26.00	26.93% *
20	37.82	95.20	-7.14	22.16	23.28% *
21	40.93	87.95	-4.46	10.76	12.24% *
22	44.15	81.54	-5.34	11.21	13.74% *
23	46.19	77.94	-7.94	16.18	20.76% *

Fonte: elaboração dos autores.

Notas: essa tabela apresenta algumas informações para cada hora do dia. A primeira coluna é a hora, a segunda coluna apresenta a velocidade média e o tempo de deslocamento médio para aquelas horas nos meses antes da alteração de velocidade. Após a linha divisória, são apresentados os valores da análise estatística. A coluna vermelha apresenta o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT na sigla em inglês) da agregação do estudo de eventos para cada hora em um único coeficiente médio. A variável dependente é o tempo de viagem em cada rota num determinado horário num determinado dia em segundos por quilômetro, conforme equação (4), excluindo as rotas tratadas no mês 7. Para a agregação do efeito dinâmico em um coeficiente simples, cada sub-grupo de tratamento recebeu um peso equivalente ao seu peso na amostra. Utilizou-se o pacote em linguagem R chamado did de Callaway e Sant'Anna (2021) para as estimações. Na coluna ao lado esquerdo da coluna em vermelho é apresentada a variação na velocidade média dada a variação nos tempos de deslocamento. A coluna de variação percentual mostra como a alteração no tempo de deslocamento (em vermelho) se relaciona com o tempo de deslocamento inicial (em cinza). Por fim, a última coluna apresenta * quando a variação no tempo de deslocamento (em vermelho) é estatisticamente significativa, e nada do contrário.