

COMO UNIR A AGENDA DE REDUÇÃO DE EMISSÕES E AUMENTO DA SEGURANÇA VIÁRIA

Marina Leite de Barros **Baltar**¹, Larissa Rodrigues **Turini**²

(1 – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transporte – COPPE, mabaltar@pet.coppe.ufrj.br, <https://orcid.org/0000-0003-3132-780X>, 2 – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil – COPPE, larissa.turini@gamil.com, <https://orcid.org/0000-0002-2841-7807>)

Resumo: O artigo teve como objetivo levantar medidas para melhorar o gerenciamento do tráfego urbano com foco em soluções sustentáveis para reduzir o impacto ambiental e aumentar a segurança viária. A pesquisa utilizou uma revisão de literatura científica, realizada nas bases de dados Web of Science e Scopus. A metodologia foi dividida em quatro etapas: definição do protocolo de revisão, determinação do referencial base, obtenção da base final e análise exploratória. Os resultados contemplaram uma busca de 237 artigos selecionados, que se apresentaram aptos a inclusão do repositório da pesquisa, sendo a primeira publicação realizada em 1974, tendo o pico no ano de 2022. O estudo buscou soluções para alcançar sistemas de transporte com baixo teor de carbono e maior segurança viária, incluindo intervenções de uso da terra, promoção de transporte público e não motorizado, melhoria da eficiência dos veículos e estratégias de gerenciamento de demanda e tráfego. Medidas como otimização de tempos semaforicos, direção ecológica, sistemas de chegadas e partidas em cruzamentos, redução de velocidade e políticas de incentivo a veículos mais eficientes são destacadas.

Palavras-chave: Segurança viária, emissões, transporte sustentável.

TO MERGE THE EMISSIONS REDUCTION AGENDA WITH ROAD SAFETY ENHANCEMENT

Abstract: The article aimed to identify measures to improve urban traffic management with a focus on sustainable solutions to reduce environmental impact and enhance road safety. The research employed a review of scientific literature conducted using the Web of Science and

Scopus databases. The methodology was divided into four stages: defining the review protocol, establishing the foundational framework, obtaining the final dataset, and conducting exploratory analysis. The results encompassed a search of 237 selected articles, deemed suitable for inclusion in the research repository. The first publication dates to 1974, with a peak in the year 2022. The study sought solutions to achieve low-carbon transportation systems and increased road safety. These included interventions related to land use, promotion of public and non-motorized transportation, vehicle efficiency enhancement, and demand and traffic management strategies. Measures such as optimizing traffic signal timing, eco-driving, intersection arrival and departure systems, speed reduction, and policies incentivizing more efficient vehicles are highlighted.

Keywords: Road safety, emissions, sustainable transportation.

UNIR LA AGENDA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES CON EL AUMENTO DE LA SEGURIDAD VIAL

Resumen: El artículo tuvo como objetivo identificar medidas para mejorar la gestión del tráfico urbano, centrándose en soluciones sostenibles para reducir el impacto ambiental y aumentar la seguridad vial. La investigación utilizó una revisión de la literatura científica, realizada en las bases de datos Web of Science y Scopus. La metodología se dividió en cuatro etapas: definición del protocolo de revisión, determinación del marco teórico, obtención de la base final y análisis exploratorio. Los resultados incluyeron una búsqueda de 237 artículos seleccionados, que fueron considerados aptos para la inclusión en el repositorio de la investigación, siendo la primera publicación realizada en 1974, con un pico en el año 2022. El estudio buscó soluciones para lograr sistemas de transporte con bajas emisiones de carbono y una mayor seguridad vial, incluyendo intervenciones en el uso del suelo, promoción del transporte público y no motorizado, mejora de la eficiencia de los vehículos y estrategias de gestión de la demanda y el tráfico. Se destacaron medidas como la optimización de los tiempos de los semáforos, la conducción ecológica, los sistemas de llegada y salida en cruces, la reducción de la velocidad y políticas de incentivo para vehículos más eficientes.

Palabras clave: Seguridad vial, emisiones, transporte sostenible.

Introdução

O crescimento urbano causa uma variedade de problemas para a própria cidade, como a dificuldade de destinação dos resíduos urbanos, a complexidade das redes de transportes e de comunicações, a sobrecarga da infraestrutura da cidade e a falta de políticas suficientes para a proteção ambiental urbana (Tran, 2022). Especificamente no que tange aos transportes, a taxa de motorização mundial tem se tornado um problema social, ambiental e econômico (Jakob et al., 2006), visto que o crescimento urbano sem um planejamento voltado para a sustentabilidade levou a um aumento dos congestionamentos e as externalidades associadas, entre elas o aumento da insegurança viária e da poluição atmosférica. Diante desse cenário, as principais questões levantadas pelas pesquisas em gestão de transportes estão ligadas a como resolver efetivamente o congestionamento de tráfego, reduzir a poluição gerada pelos transportes nas áreas urbanas e questões ligadas a segurança viárias (Rešetar et al., 2018a).

Os dados do WHO (2018) demonstram que aproximadamente 1,3 milhão de pessoas morrem a cada ano nas estradas do mundo e entre 20 e 50 milhões sofrem lesões não fatais devido aos sinistros de trânsito. O Brasil, especificamente, foi o país com terceira maior quantidade de mortos por sinistro no mundo, superado somente pela Índia e pela China. Além disso, o trânsito é a principal causa de morte entre os jovens em um contexto mundial e os países de baixa e média renda possuem taxas de mortalidade por lesões no trânsito mais do que duas vezes superiores aos países de alta renda (OMS, 2015), deixando mais clara a disparidade de desenvolvimento entre eles.

Ainda, o tráfego tem sido reconhecido como um contribuinte para emissões que levam a sérios problemas ambientais e de saúde pública, tornando-se o maior contribuinte para mortes prematuras (Abubakar, 2022) e uma vez que o tráfego urbano é uma importante fonte de emissões de dióxido de carbono (CO₂) e NO_x, as cidades desempenham um papel fundamental na prevenção das mudanças climáticas e combate à poluição do ar, a maioria dos pesquisadores concorda com a necessidade de projetar estratégias abrangentes de mitigação em vez de aplicar medidas isoladas (Perez-Prada & Monzon, 2017). Portanto, em relação a poluição atmosférica, nota-se que o estabelecimento de políticas públicas e ações de mitigação que realmente controlem a concentração de poluentes atmosféricos em áreas urbanas tem sido um grande desafio para os tomadores de decisão (Maes et al., 2019).

Neste contexto, conforme a (ONU, 2014), a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável tem entre os seus objetivos tornar as cidades e os assentamentos humanos

inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis (Objetivo 11) e tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos (Objetivo 13). Além do mais, uma das justificativas utilizadas pela ONU (2020) ao anunciar a Segunda Década de Ação pela Segurança do Trânsito (2021-2030) foi exatamente a necessidade de atendimento aos ODS, o que demonstra uma forte ligação entre segurança viária e a sustentabilidade. Adicionalmente, dependendo do nível de serviço em que a via está trabalhando, a ocorrência de sinistros aumenta o congestionamento, o que contribui para o aumento da emissão de poluentes veiculares em consequência do fluxo de tráfego intermitente, gerado pela condição imposta pelo gargalo na via (Barth & Boriboonsomsin, 2008; Chung et al., 2013; Zhang et al., 2011; Sookun et al., 2014). Dia & Gondwe (2008) estimaram que a redução da duração de um incidente de pista dupla de 30 para 15 minutos resultou em reduções de 11,2% no consumo de combustível. Ademais, estudos mostram que as taxas de emissão dos veículos que trafegam em zonas de obra ou em incidentes aumentam (Avetisyan, 2014) e que as emissões devido ao congestionamento não recorrente gerado por obras viárias são maiores se comparado com as filas de congestionamentos recorrentes (Zhang et al., 2011).

Entretanto, compreender as estratégias mais econômicas para mitigar dos congestionamentos de tráfego e custos ambientais relacionados em viagens realizadas nos modos rodoviários tem sido apontada como uma das questões críticas no transporte para os próximos vinte anos segundo a *National Academies of Sciences* (2018) e de maneira quantitativa, é estimado que os custos externos gerados pelos transportes correspondem a cerca de 7% do PIB da EU (EC, 2018).

Em consequência da necessidade em utilizar os recursos existentes de forma consciente, gerando menor poluição ao meio ambiente, a sustentabilidade tem sido amplamente discutida no meio acadêmico, devido a importância de manter os objetivos econômicos das organizações protegendo o meio ambiente e melhorando a qualidade de vida da população (White & Lee, 2009; Gunasekaran et al., 2014). Estratégias que envolvem sustentabilidade são complexas devido a necessidade de equilibrar os aspectos sociais, econômicos e ambientais. É a união desses três aspectos que dão a qualquer projeto o potencial de reduzir impactos no meio ambiente e na vida das pessoas.

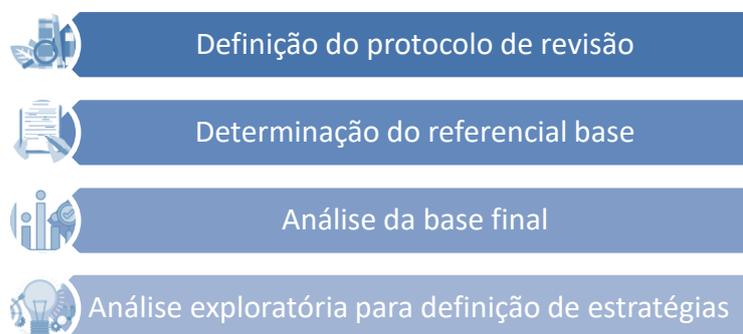
Diante da problemática exposta, as contribuições apresentadas nesse artigo buscam indicar aspectos que relacionam as emissões de poluentes e a segurança viária e propor

estratégias que podem reduzir as emissões e aumentar a segurança viária através de uma revisão bibliográfica sistemática. Para alcançar isso, além dessa seção introdutória: a Seção 2 traz o procedimento metodológico, a Seção 3 apresenta a análise da base de dados estudada, a Seção 4 aponta as medidas que podem ser adotadas visando ambos os objetivos e, por fim, a Seção 5 contém as considerações finais e possíveis propostas de novos estudos.

Metodologia Proposta

A metodologia proposta (Figura 1) pela presente busca é baseada em uma revisão sistemática da literatura dividida em quatro etapas: definição do protocolo de revisão, determinação do referencial base para a pesquisa, obtenção da base final, análise da base final e análise exploratória para definição de estratégias que podem reduzir as emissões e aumentar a segurança viária.

Figura 1: Metodologia proposta



Fonte: Autoria própria.

Na primeira etapa de definição do protocolo de revisão foi definido o objetivo da pesquisa, os critérios de inclusão e qualificação e o método de busca. Definiu-se como tempo de cobertura todos os anos de cobertura do banco de dados, observou-se o enquadramento com os objetivos propostos e a busca foi realizada nas bases *Web of Science* e *Scopus*, por serem ferramentas amplamente reconhecidas e consideradas confiáveis na comunidade acadêmica (Ameen, 2018) e dois bancos de dados líderes em citações mundiais e concorrentes (J. Zhu & Liu, 2020), conforme critérios e descrições apresentados na Tabela 1. As palavras-chave foram selecionadas para garantir uma pesquisa abrangente e precisa, alinhada ao objetivo de identificar possíveis relações entre emissões de poluentes e segurança viária. Optou-se por não

especificar um tipo particular de poluente e utilizar a conjunção "AND" para conectar de forma clara e direta os dois temas centrais em análise. Além disso, com os critérios buscou-se responder se existe uma relação entre estratégias que reduzem a emissão e melhoram a segurança viária.

Tabela 1: Critérios e descrição de busca

Critério	Descrição
<i>Web of Science: Tópico</i> <i>Scopus: Article title,</i> <i>abstract, keywords</i>	<i>“traffic safety” AND emission</i>
Inclusão	Tempo de cobertura: todos os anos do banco de dados; Enquadramento com os objetivos propostos; Tipos de documento: apenas artigos.
Data da pesquisa	08 de maio de 2023.

Na segunda etapa foi feita uma triagem de artigos e a determinação do referencial base, para isso, uniu-se o resultado obtido nas duas bases utilizadas, retirou-se os artigos repetidos e, por fim, realizou-se uma análise completa dos artigos encontrados e aplicação dos critérios de inclusão e qualificação para triagem final dos estudos, tal como compatibilidade do resumo com o escopo do presente estudo e ser um artigo científico completo publicado em periódicos reconhecidos. Ao fim dessa etapa foram obtidos os estudos que compuseram a base final de análise e então utilizados no desenvolvimento do artigo.

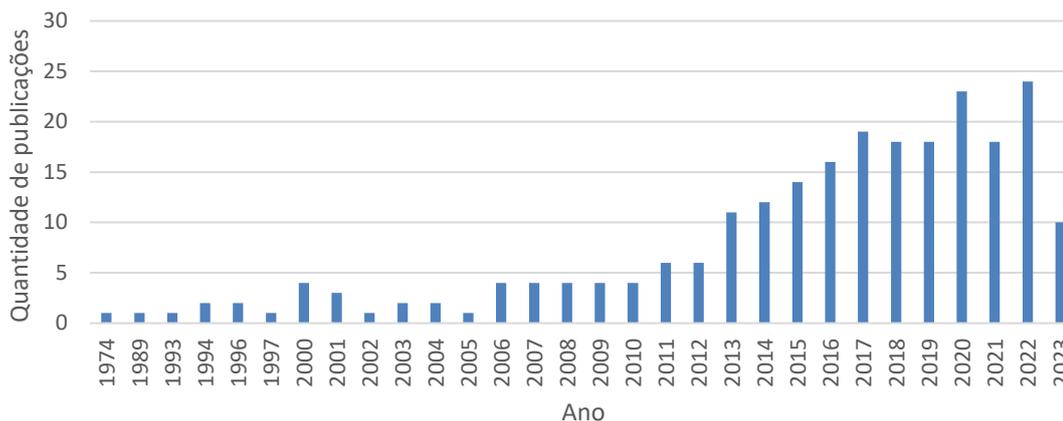
Na terceira etapa foi feita uma análise da base final, observando o ano das publicações, principais periódicos, as palavras que mais se repetem no título, além dos autores mais citados e locais de publicação. Já na quarta, e última etapa, foi realizada uma análise exploratória para definição de estratégias que conseguem reduzir a emissão de poluentes e aumentar a segurança viária afim de atingir parte dos objetivos do desenvolvimento sustentável.

Análise da Base de Dados Final

Na pesquisa inicial realizada na Etapa 1 foram obtidos 139 artigos na base *Web of Science* e 224 na *Scopus*. Após a remoção de artigos duplicados e daqueles que não estavam diretamente relacionados ao tema em estudo, a combinação das duas bases resultou em um total de 237 artigos. Nesse sentido, na Figura 2 apresenta-se a evolução das publicações sobre o

tema ao longo dos anos. Nela, verifica-se que a primeira publicação foi registrada em 1974, contudo em 2006 é possível observar um aumento nos números de publicações, tendo o pico no ano de 2022.

Figura 2: Quantidade de publicações por ano



Fonte: Autoria própria.

Ao analisar as revistas que mais trataram sobre o tema, obteve-se: *Accident Analysis and Prevention* (9 estudos), *Science of the Total Environment* (6), *Sustainability* (6), *International Journal of Environmental Research and Public Health* (5) e *Transportation Research Record* (5).

Os cinco artigos mais citados da base de dados analisada, vide Tabela 2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, são sobre escolha de rota buscando um menor consumo de combustível (Ericsson et al., 2006), comportamento do motorista ao dirigir (Júnior et al., 2017; Várhelyi et al., 2004), sistema de tarifação de congestionamento (Ericsson et al., 2006) e emissões veiculares (Fruin et al., 2004).

Para buscar as principais palavras utilizadas nos títulos dos artigos analisados foi desenvolvida uma nuvem de palavras com todos os títulos, sendo quanto mais a palavra aparece na base de dados, maior o seu tamanho na Figura 3. Como já era esperado, as palavras que mais apareceram foram *traffic*, *safety*, *vehicle*, *transport* e *emission*. Porém, é interessante observar outras palavras que aparecem com frequência como *speed*, *control*, *driving*, *management* e *design*, elas colocam luz já a importantes medidas a serem adotadas por um tráfego mais sustentável.

de gerenciamento de demanda de transporte e soluções de gerenciamento de tráfego (Perez-Prada & Monzon, 2017).

Conforme Tabela 3 diversas medidas podem auxiliar tanto redução de emissões pelo transporte quanto no aumento da segurança viária. Essas medidas envolvem desde ações que podem ser adotados pelo setor público quanto pelo setor privado e que abrangem diversas áreas de interesse, deixando claro que para alcançar realmente a sustentabilidade é necessário um esforço conjunto.

Tabela 3: Medidas observadas e autores

Medidas	Autores
Otimização de tempo semafórico	Tran et al. (2022b)
Incentivo a mudanças na forma de dirigir	Jiang et al. (2018); Júnior et al. (2017); Kircher et al. (2014); Szumska & Jurecki (2020); Várhelyi et al. (2004)
Mudança nos veículos	Rešetar et al., (2018b); Wenzel (2013)
Utilização de veículos elétricos	Cocron & Krems (2013)
Mudança no desenho viário	Li & Sun (2017)
Redução de velocidade	Peña-García et al. (2019); Perez-Prada & Monzon (2017)
Medidas de moderação de tráfego	Jaarsma & Langevelde (2011); Zhu et al., (2022)
Ruas verdes	Shaneyfelt et al. (2017)
Incentivo de transporte público e transporte não motorizado	Elvik (2019); Mansoor et al. (2022); Mu & de Jong (2012); Ngoc et al. (2022); Tiwari et al. (2016)
Políticas públicas relacionadas a impostos e taxas	(Eliasson (2009); Rešetar et al. (2018b)
Mudança no seguro veicular	Greenberg (2009); Tselentis et al. (2017)
Roteamento veicular e informação em tempo real	Ericsson et al. (2006); Rönnqvist et al. (2017)

Para melhorar o gerenciamento do tráfego urbano, (Tran et al., 2022b) afirma que vias mais largas com mais faixas e semáforos mais complexos não é uma solução sustentável. O mesmo autor fala que a otimização de tempos semafóricos é uma solução extremamente necessária no cenário de fluxo de tráfego congestionado, além de gerar visões de cidades inteligentes. Em seu trabalho, Tran et al. (2022b), buscou otimizar os tempos semafóricos através da análise simultânea de eficiência de tráfego, segurança e fatores ambientais. Os resultados demonstraram que o modelo era adequado para melhorar a temporização de semáforos e a utilização de heurísticas reduz consideravelmente o tempo de solução do modelo.

O comportamento do motorista afeta a segurança no trânsito, o consumo de combustível e as emissões de gases. Júnior et al. (2017) fizeram essa investigação através de diferentes sensores de *smartphones* e algoritmos de classificação para explicar os diferentes modos de dirigir. A direção ecológica (*eco-driving*) é uma medida imediata e de custo relativamente baixo para reduzir significativamente o consumo de combustível e as emissões e os principais fatores considerados são aceleração/desaceleração, velocidade de direção, escolha de rota e marcha lenta (Huang et al., 2018).

Nesse mesmo sentido, Jiang et al. (2018) propuseram um sistema de chegadas e partidas para veículos que convertem à esquerda em um cruzamento sinalizado com tempo fixo considerando questões ecológicas e a utilização de veículos autônomos. Todas as trajetórias de velocidade ecológica são otimizadas *off-line* antes da implementação de sistema e a otimização da velocidade é construída a partir de um sistema dinâmico. Os autores comprovaram que o sistema proposto aumenta significativamente a segurança no trânsito e melhora a eficiência de combustível e a redução de emissões de veículos que viram à esquerda sem nenhum efeito adverso sobre mobilidade, e tem uma boa robustez contra a aleatoriedade do tráfego.

Quanto a maneira de dirigir, diversos estudos mostram como a direção agressiva é entendida como mais insegura, o que implica no aumento do risco de sinistros potenciais (Shen et al., 2018). Szumska & Jureckim (2020) buscaram investigar também a influência dessa maneira de dirigir nas emissões de poluentes atmosféricos por meio de simulações de tráfego com base em perfis de velocidade reais coletados em condições de condução urbana e em rodovias. A hipótese inicial da pesquisa foi confirmada, principalmente na área urbana onde observou-se que um estilo de direção agressivo resulta em maior consumo médio de combustível e em poluição emissões até 30% a 40% acima da média em comparação com uma condução calma.

Especificamente sobre os sistemas de direção ecológica, Kircher et al. (2014) estudou os efeitos da informação de eco-condução visual intermitente *versus* contínua no comportamento do olhar em uma tentativa de encontrar a melhor abordagem para exibir informações de direção ecológica de um tráfego perspectiva de segurança. Como resultado, a informação intermitente é recomendada em vez da contínua, pois apresenta as informações em localizações estrategicamente vantajosas e pouco exigentes para o condutor.

Já pensando em políticas que podem ser adotadas visando ambos os objetivos, Wenzel (2013) discute a relação entre o peso do veículo e a segurança e conclui que o incentivo a utilização de carros mais leves e menores como minivans para transporte de carga resultarão em reduções no consumo de combustível e nas emissões de gases de efeito estufa ao mesmo tempo em que melhora a segurança. Ao testar os *airbags* laterais, por exemplo, o autor verificou que eles reduzem o risco de fatalidade em carros, mas o mesmo não ocorre com caminhões leves ou minivans, se atingidos na lateral por outro veículo leve. Outra medida testada foi o melhor alinhamento dos para-choques de caminhões leves com os de outros veículos, ela parece resultar em uma redução estatisticamente significativa do risco imposto aos ocupantes do carro, porém tem um impacto muito pequeno quando relaciona a massa do veículo e o risco de fatalidade por veículo por milha percorrida (VMT).

Nesse mesmo sentido, os padrões de economia média de combustível determinados pela *U.S. Corporate Average Fuel Economy (CAFE)* foram alterados de forma que veículos maiores tenham metas de economia de combustível mais baixas. White & Lee (2009) estudaram se isso incentivou as empresas a aumentarem o tamanho dos veículos, implementar recursos de tecnologia para economia de combustível e modificar a capacidade de aceleração. Os resultados sugerem que essa política criou um incentivo para aumentar o tamanho dos veículos, exceto quando o consumidor tem preferência por aceleração se comparado ao tamanho veicular. Observou-se também que o tamanho médio do veículo ponderado pelas vendas aumenta em 2 a 32%, prejudicando os ganhos na economia de combustível.

O impacto das mudanças na estrutura do veículo na segurança do trânsito, bem como no meio ambiente e saúde humana, foi analisado por Rešetar et al. (2018b) com base em dados processados do Centro de Veículos da Croácia (CVH) e os resultados do estudo indicaram que a crise econômica de 2008 e as consequências da adesão da Croácia à União Europeia em 2013 trouxeram tendências desfavoráveis e mudança no padrão veicular utilizado. Os pontos

levantados pelos autores foram o fato de o imposto anual diminuir com a idade do veículo, e depois dos dez anos, não ter mais imposto o que torna a tributação a favor dos veículos mais antigos e o fato de a compra de um veículo deve-se pagar uma taxa ecológica que é mais cara para veículos novos do que para os usados, o que é diretamente o oposto do objetivo desejável. Portanto, fica claro a importância de políticas nacionais buscando inverter essas tendências adversas.

Ericsson et al. (2006) apresentou uma análise de custo-benefício do sistema de tarifação de congestionamento de Estocolmo, com base nos dados observados e não nos dados previstos pelo modelo. Os impactos na segurança do tráfego e nas emissões foram calculados usando relações CBA suecas padrão. O sistema apresenta um excedente social significativo, suficiente para cobrir tanto os custos de investimento como os custos operacionais, visto que os custos do sistema são “recuperados” em termos de benefícios sociais em cerca de 4 anos.

Alguns estudos demonstram que os veículos elétricos silenciosos podem implicar negativamente na segurança de pedestres NHTSA (2009); Pardo-Ferreira et al. (2020) devido à dificuldade de escutá-los. Porém, trazendo outra visão para esse caso, (Cocron & Krems, 2013) realizaram estudos de campo em cidades alemãs ao examinar as experiências de 70 motoristas ao dirigir esse tipo de veículo antes de iniciar a experiência, três meses e seis meses depois. Constatou-se que os incidentes devido à baixa emissão de ruído raramente ocorrem, principalmente em ambientes de baixa velocidade. Além disso, notou-se que os motoristas ajustam sua avaliação dos perigos relacionados ao ruído, sugerindo que os perigos associados com baixas emissões de ruído podem ser menos significativo do que o esperado anteriormente.

Os congestionamentos de tráfego causados por estrangulamentos rodoviários, tanto na área urbana quanto na rodovia, pioram significativamente o aumento do consumo de energia e poluição do ar, além disso ele incentiva o efeito de mudança de faixa. Buscando analisar essa interação veicular, Li & Sun (2017) simularam diversos cenários observando mudança no desenho da via, segurança viária e emissões. Verificou-se que um limite de velocidade mais alto, leva ao aumento da velocidade média e menor consumo de energia, porém é mais prejudicial à segurança viária. Já quando há redução de uma faixa de tráfego, a distância da sinalização é de fundamental importância, principalmente em vias com densidade média. No cenário com obstruções móveis, não se observou grandes diferenças na capacidade da via, porém a segurança no trânsito é muito influenciada pelo gargalo.

Os efeitos a longo prazo do pedal de acelerador ativo foram avaliados em campo por Várhelyi et al. (2004) e os resultados mostraram que a uniformidade dos motoristas com os limites de velocidade melhorou consideravelmente. A redução das velocidades médias e a menor variação de velocidade dos veículos indicaram um grande potencial para segurança no trânsito, os tempos de viagem não foram afetados e os volumes de emissão diminuíram significativamente.

Perez-Prada & Monzon (2017) estudaram a redução de velocidade de 90 km/h para 70 km/h e observaram que além da medida ter contribuído para a segurança no trânsito, essa estratégia também pode ser vista como positiva para o meio ambiente devido ao consumo de combustível reduzido e emissões mais baixas. No entanto, limites de velocidade mais baixos têm taxas mais baixas de aceitação da comunidade devido ao seu impacto nos tempos médios de viagem no nível individual. Porém, vale ressaltar, que os resultados mostraram que, nesta faixa de velocidade, limites mais baixos apresentam oportunidades importantes para a redução de GEE e poluição do ar no trecho afetado pela medida, sem alterar substancialmente desempenho do tráfego. A implementação da nova política de limite de velocidade produziu uma redução de 14,4% e 16,4% nas emissões de CO₂ e NO_x, respectivamente, enquanto o tempo de viagem global permanece praticamente constante.

Qin et al. (2021) mostraram em seu estudo que diminuir a velocidade máxima em túneis rodoviários permite diminuir a luminância necessária nas zonas de limiar e transição e até o comprimento dessas zonas, essas regiões são onde ocorre maior consumo de energia. Esse alto consumo em túneis rodoviários tornou-se um tema importante nos últimos anos devido aos custos financeiros, energia consumida, uso de matérias-primas de materiais, emissões de gases de efeito estufa devido ao número notável de elementos manufaturados e manutenção (Qin et al., 2021). Vale ressaltar, ainda, que a manutenção é perigosa e dispendiosa e exige cortes de tráfego ou operações muito arriscadas envolvendo muitos trabalhadores, polícia de trânsito e anulação de uma faixa de rodagem por horas com o conseqüente impacto na fluidez do tráfego. Portanto, os resultados do estudo sugerem fortemente a conveniência de introduzir redução máxima de velocidade nas regras de trânsito que, além disso, podem criar sinergias positivas com a segurança viária.

Jaarsma & Langevelde (2011) estudaram o impacto de medidas de moderação de tráfego em rodovias com a presença de vidas selvagens no entorno. A análise indica que a escala e a

eficiência das medidas de moderação do tráfego afetam significativamente a segurança, o tempo de viagem e persistência da população de vida selvagem. Observou-se que áreas grandes com medidas de moderação de tráfego sentem menos o ganho de segurança. Outro ponto importante é quanto a quantidade de acessos, o número de mortes é reduzido em até 52% quando os fluxos antes difusos nas vias de acesso são agrupados em um número limitado de estradas.

Atualmente, considera-se que a arborização das ruas desempenha um papel importante no desenho urbano e as árvores de rua também são consideradas medidas de moderação de tráfego. Os resultados de Zhu et al. (2022) demonstraram que o risco de sinistros envolvendo pedestres são reduzidos quando há faixas de pedestres e aumento da densidade de árvores, porém aumentam devido a largura da via, existência de pontos de parada de transporte público e estacionamento.

Buscando uma visão de projeto viário não concentrada quase exclusivamente nos automóveis, Shaneyfelt et al. (2017) fazem considerações gerais de projeto para ruas verdes que combinam gestão de águas pluviais e qualidade do ar. Esses projetos são hidraulicamente mais eficientes, tentam minimizar a extensão espacial e temporal da propagação da água, e portanto, melhorar a segurança do motorista, visto que, projetos com essa meta buscam também aumentar a segurança e a capacidade de locomoção, melhorar a qualidade do ar e minimizar o efeito de ilha de calor urbana. As considerações incluem o tamanho dos edifícios e sua distância em relação a via, o tipo de árvore a ser utilizado e a importância da análise de ventos predominantes.

As principais cidades dos países em desenvolvimento têm experimentado uma contínua deterioração do sistema de transporte e da qualidade do ar, muitas vezes devido à planejamento e falta de recursos. A queda no desempenho do sistema causa perda de tempo e dinheiro em níveis individuais. Além disso, devido à poluição do ar, os moradores da cidade têm sofrido de problemas de saúde, incluindo doenças respiratórias, que afetam o sistema de saúde do país e sua economia como resultado disso Mansoor et al. (2022). Mudar essa realidade é uma importante política na busca de sustentabilidade das cidades.

Mu & de Jong (2012) afirmam que na China, por exemplo, têm se investido em construir e melhorar sistemas de transporte ferroviário urbano e redes de ônibus para evitar o aumento do congestionamento do tráfego e deterioração das condições ambientais. Dentro desse contexto, o desenvolvimento orientado para o transporte (TOD) surgiu como uma possibilidade

solução para transporte urbano sustentável, porém é importante ressaltar que muito depende da coragem por parte dos líderes políticos para desenvolver políticas visto que isso incluirá a reformulação do uso do solo, planejamento integral com maior foco na rede de transporte, restrição de posse e uso do carro e apoio das empresas imobiliárias para atender investimentos mais amplos em transporte sustentável.

Um estudo realizado na cidade de Oslo na Noruega por Elvik (2019) mostra uma redução no número estimado e registrado de lesões quando 10% das viagens (pessoas/km) que são realizadas de carro são transferidas para caminhadas, ciclismo ou transporte público. (Mansoor et al., 2022) a partir de uma revisão de literatura e observou que os formuladores de políticas nos países em desenvolvimento devem considerar o transporte não motorizado como um elemento da matriz de soluções para enfrentar os desafios do transporte rodoviário. O aumento do uso de transporte não motorizado se mostra válido para muitos países em desenvolvimento com formas urbanas favoráveis e alta densidade populacional. Além do mais, a união do transporte público com o transporte não motorizado gerará sinergias em termos de redução de emissões de gases e necessidade de infraestrutura. Uma questão destacada pelos autores são as visões culturais que podem prejudicar a oportunidade de alta penetração do transporte não motorizado, para isso é necessária a adoção de campanhas para eliminar visões culturais negativas e aumentar a conscientização sobre os benefícios deste modo.

Considerando o transporte público e o transporte não motorizado, Tiwari et al. (2016) mostraram mediante um estudo de caso em cidades indianas que o cenário com a maior redução de CO₂ ocorre quando as infraestruturas do transporte público e não motorizado são melhoradas. É neste cenário que também ocorre melhoria no indicador de segurança viária. Entretanto investimentos apenas no transporte público não são suficientes para maximizar os benefícios.

Ngoc et al. (2022) afirmam que o aumento do uso de motocicletas em cidades vietnamitas ocorreu devido a insegurança no uso de bicicletas e transporte público. Em seu estudo, os autores examinaram os comportamentos de viagem em cinco grandes cidades vietnamitas e compararam o impacto da melhoria do transporte público na escolha do modo de transporte, nas emissões e segurança no trânsito. Observou-se que investimento na melhoria o sistema de transporte público contribuiria em parte para reduzir as emissões e os sinistros de

trânsito nas cidades vietnamitas e as diferenças nas melhorias observadas devem à heterogeneidade das transferências dos modos de transportes em cada cidade.

Quanto ao seguro veicular, Greenberg (2009) estudou a conversão do custo fixo de seguro em cobrança por distância viajada (*Pay as you drive* - PAYD) o que encorajaria reduções voluntárias na condução com concomitantes reduções no congestionamento, poluição do ar, emissões de gases de efeito estufa, sinistros e solicitações de seguros. A ideia do autor é estimar os benefícios líquidos de cada milha não percorrida e a redução de quilometragem que resultaria do seguro para aplicar o desconto, dessa forma seria encorajada a redução de distância viajada que é uma estratégia eficaz na redução do impacto no meio ambiente e na segurança, junto com o congestionamento e os custos de infraestrutura do governo.

Tselentis et al. (2017) apresentaram um estudo com o objetivo de fornecer uma revisão das metodologias mais populares e frequentemente implementadas relacionadas ao seguro automóvel baseado no uso (UBI), além dos esquemas de PAYD, os autores trazem o conceito de pagar conforme dirige (*Pay how you drive* - PHYD). O resultado foi que há evidências de que a implementação do UBI eliminaria o fenômeno dos subsídios cruzados, o que implica em menor custos de seguro para motoristas menos arriscados e expostos. Também forneceria uma forte motivação para os motoristas melhorarem seu comportamento ao dirigir, mudar seu comportamento de viagem e reduzir seu grau de exposição, o que resultaria na redução do risco de colisão.

Sistemas inteligentes de transportes que envolvem roteamento veicular também podem ser uma importante ferramenta na busca da sustentabilidade Harris et al. (2014), por exemplo, apresentou um sistema de geração de rotas online que encontra a melhor rota quando muitos objetivos conflitantes estão envolvidos a partir de análises em um ambiente colaborativo. Uma de suas principais características é o uso de um processo de otimização inversa que estabelece mais de 100 pesos para distância, velocidade, valores sociais, impactos ambientais, segurança no trânsito, estresse do motorista, consumo de combustível, emissões de dióxido de carbono e custos.

Também tratando de roteamento veicular, Ericsson et al. (2006) buscaram estimar o potencial de redução do consumo de combustível e, conseqüentemente, da emissão de dióxido de carbono através de um sistema de navegação onde a otimização da escolha da rota é baseada no menor consumo total de combustível, conclui-se que as informações de tráfego em tempo

real têm o potencial de economizar combustível em áreas mais congestionadas se uma proporção suficientemente grande das perturbações no tráfego puder ser identificada e relatada em tempo real.

Diante do exposto nessa seção, as medidas de segurança e sustentabilidade no trânsito tornam-se fundamentais para enfrentar os desafios do transporte urbano e a busca por cidades mais inteligentes e sustentáveis. A implementação de estratégias como otimização de tempos semaforicos, direção ecológica, sistemas de chegadas e partidas em cruzamentos, redução de velocidade, melhorias no transporte público e incentivos para o uso de meios não motorizados têm o potencial de melhorar a segurança viária, reduzir as emissões de gases poluentes, diminuir o congestionamento e promover o uso eficiente de recursos.

Essas medidas, aliadas ao desenvolvimento de infraestruturas inteligentes, sistemas de tarifação de congestionamento, políticas de planejamento urbano voltadas para a mobilidade sustentável e o estímulo à adoção de veículos mais eficientes, podem contribuir significativamente para alcançar cidades mais seguras, com menor impacto ambiental e melhores condições de vida para seus habitantes.

É importante ressaltar que o enfrentamento desses desafios requer ações coordenadas e políticas integradas, envolvendo governos, empresas, instituições acadêmicas e a sociedade como um todo. Além disso, é fundamental que as decisões sejam baseadas em dados e estudos científicos, para que as soluções adotadas sejam efetivas e tragam benefícios reais para a população e o meio ambiente.

Portanto, o desenvolvimento de estratégias inteligentes, sustentáveis e seguras no trânsito é uma pauta prioritária para os próximos anos, e as ações tomadas nesse sentido terão um impacto significativo na qualidade de vida das pessoas, na preservação do meio ambiente e na construção de cidades mais resilientes e preparadas para os desafios do futuro.

Considerações Finais

- Este artigo apresentou uma revisão sistemática da literatura científica sobre emissões de poluentes e segurança viária, utilizando as bases de dados *Web of Science* e *Scopus*. Os resultados revelaram que o tema ganhou relevância desde 1974, com um notável aumento de publicações a partir de 2006, alcançando um pico em 2022. Periódicos de alto impacto, como o *Accident Analysis and Prevention*, *Science of the Total Environment* e *Sustainability*, também contribuíram com estudos nessa área, conforme

indicado pela nuvem de palavras com destaque para termos como *"traffic"*, *"safety"*, *"vehicle"*, *"transport"* e *"emission"*.

- Diante da análise sistemática realizada, fica claro que para alcançar sistemas de transporte com baixas emissões de carbono e maior segurança no trânsito é essencial adotar uma abordagem integrada. Isso envolve intervenções relacionadas ao uso da terra, promoção do transporte público e não motorizado, melhoria da eficiência dos veículos e implementação de estratégias de gerenciamento de demanda e tráfego. Além disso, é crucial considerar o impacto do comportamento dos motoristas no trânsito e incentivar práticas de direção mais ecológicas.
- As evidências obtidas reforçam a importância de políticas nacionais que promovam o uso de veículos mais eficientes, bem como o aprimoramento da infraestrutura urbana para favorecer o transporte não motorizado, contribuindo para a segurança viária e a sustentabilidade ambiental. Medidas como a otimização dos tempos semafóricos, sistemas inteligentes em cruzamentos e a redução de velocidade mostram-se eficazes na melhoria da segurança e na redução das emissões de poluentes.
- A convergência das tecnologias inteligentes e soluções inovadoras, como os sistemas de navegação com foco na redução do consumo de combustível e poluição do ar, também despontam como uma promessa para enfrentar os desafios do transporte urbano. Da mesma forma, políticas de seguros automobilísticos baseadas no comportamento do condutor podem incentivar uma condução mais segura, reduzindo a demanda por veículos impactando positivamente o meio ambiente e a segurança viária.
- Nesse contexto, é fundamental que governos, empresas, instituições acadêmicas e a sociedade em geral atuem de forma colaborativa, buscando implementar soluções integradas embasadas em dados científicos para maximizar os benefícios e minimizar os impactos negativos. A busca por cidades mais inteligentes, sustentáveis e seguras deve ser uma prioridade, exigindo investimentos, planejamento estratégico e ações coordenadas em diversas frentes.
- Como estudos futuros sugere-se definir em quais os níveis de planejamento (estratégico, tático ou operacional) cada uma das medidas podem ser incluídas e desenvolver uma matriz de responsabilidade para entender como os diferentes níveis governamentais e as empresas privadas podem auxiliar nessa agenda.

Referências Bibliográficas

- Abubakar, A. B. , & T. G. (2022). Traffic emissions management using capacity formulation and multi-modal road space allocation. . *IET Intelligent Transport Systems*.
- Ameen, W. , G. A. M. , A. M. , A. H. , & A. A. (2018). An overview of selective laser sintering and melting research using bibliometric indicators. *Virtual and Physical Prototyping*, . *Virtual and Physical Prototyping*, 13, 282–291.
- Avetisyan, H. G. , M.-H. E. , M. S. , & Q. B. (2014). Effects of vehicle technologies, traffic volume changes, incidents and work zones on greenhouse gas emissions production. . *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 26, 10–19.
- Barth, M., & Boriboonsomsin, K. (2008). Real-world carbon dioxide impacts of traffic congestion. *Transportation Research Record*, 2058, 163–171. <https://doi.org/10.3141/2058-20>
- Chung, Y., Cho, H., & Choi, K. (2013). Impacts of freeway accidents on CO2 emissions: A case study for Orange County, California, US. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 24, 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.06.005>
- Dia, H., & Gondwe, W. (2008). *Evaluation of incident impacts on integrated motorway and arterial networks using traffic simulation*.
- EC. (2018). *Multimodal Sustainable Transport: Which Role for the Internalisation of External Costs? European Commission - Directorate-General for Transport and Mobility (DG MOVE)*. <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2018-year-multimodality-external-costs-note.pdf>.
- Elvik, R. (2019). A transport policy whose injury impacts may go unnoticed: More walking, cycling and use of public transport. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(19). <https://doi.org/10.3390/ijerph16193668>
- Ericsson, E., Larsson, H., & Brundell-Freij, K. (2006). Optimizing route choice for lowest fuel consumption - Potential effects of a new driver support tool. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 14(6), 369–383. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2006.10.001>
- Fruin, S. A., Winer, A. M., & Rodes, C. E. (2004). Black carbon concentrations in California vehicles and estimation of in-vehicle diesel exhaust particulate matter exposures. *Atmospheric Environment*, 38(25), 4123–4133. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.04.026>

- Greenberg, A. (2009). Designing pay-per-mile auto insurance regulatory incentives. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(6), 437–445. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.01.003>
- Gunasekaran, A., Irani, Z., & Papadopoulos, T. (2014). Modelling and analysis of sustainable operations management: Certain investigations for research and applications. *Journal of the Operational Research Society*, 65(6), 806–823. <https://doi.org/10.1057/jors.2013.171>
- Harris, P. B., Houston, J. M., Vazquez, J. A., Smither, J. A., Harms, A., Dahlke, J. A., & Sachau, D. A. (2014). The Prosocial and Aggressive Driving Inventory (PADI): A self-report measure of safe and unsafe driving behaviors. *Accident Analysis & Prevention*, 72, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.05.023>
- Huang, Y., Ng, E. C. Y., Zhou, J. L., Surawski, N. C., Chan, E. F. C., & Hong, G. (2018). Eco-driving technology for sustainable road transport: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 93, pp. 596–609). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.030>
- Jaarsma, C. F., & Langevelde, F. van. (2011). Effects of scale and efficiency of rural traffic calming on safety, accessibility and wildlife. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(7), 486–491. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.05.009>
- Jiang, H., An, S., Wang, J., & Cui, J. (2018). Eco-approach and departure system for left-turn vehicles at a fixed-time signalized intersection. *Sustainability (Switzerland)*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/su10010273>
- Júnior, J. F., Carvalho, E., Ferreira, B. V., De Souza, C., Suhara, Y., Pentland, A., & Pessin, G. (2017). Driver behavior profiling: An investigation with different smartphone sensors and machine learning. *PLoS ONE*, 12(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174959>
- Kircher, K., Fors, C., & Ahlstrom, C. (2014). Continuous versus intermittent presentation of visual eco-driving advice. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 24, 27–38. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.02.007>
- Li, X., & Sun, J. Q. (2017). Studies of vehicle lane-changing dynamics and its effect on traffic efficiency, safety and environmental impact. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 467, 41–58. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.09.022>
- Maes, A. de S., Hoinaski, L., Meirelles, T. B., & Carlson, R. C. (2019). A methodology for high resolution vehicular emissions inventories in metropolitan areas: Evaluating the effect of

automotive technologies improvement. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 77, 303–319. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.007>

Mansoor, U., Kashifi, M. T., Safi, F. R., & Rahman, S. M. (2022). A review of factors and benefits of non-motorized transport: a way forward for developing countries. In *Environment, Development and Sustainability* (Vol. 24, Issue 2, pp. 1560–1582). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01531-9>

Mu, R., & de Jong, M. (2012). Establishing the conditions for effective transit-oriented development in China: the case of Dalian. *Journal of Transport Geography*, 24, 234–249. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.02.010>

National Academies of Sciences, E. and Medicine. (2018). *Critical Issues in Transportation 2019*. Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/25314>

Ngoc, A. M., Nishiuchi, H., Van Truong, N., & Huyen, L. T. (2022). A comparative study on travel mode share, emission, and safety in five Vietnamese Cities. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 20(1), 157–169. <https://doi.org/10.1007/s13177-021-00283-0>

NHTSA. (2009). *Incidence of Pedestrian and Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger Vehicles Technical Report*. www.nhtsa.dot.gov

OMS. (2015). *Relatório global sobre o estado da segurança viária 2015*. https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/Summary_GSR_RS2015_POR.Pdf.> .

ONU. (2014). *Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development - A/RES/70/1*. https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.Pdf.

Pardo-Ferreira, M. C., Torrecilla-García, J. A., de las Heras-Rosas, C., & Rubio-Romero, J. C. (2020). New risk situations related to low noise from electric vehicles: Perception of workers as pedestrians and other vehicle drivers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(18), 1–16. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186701>

Perez-Prada, F., & Monzon, A. (2017). Ex-post environmental and traffic assessment of a speed reduction strategy in Madrid’s inner ring-road. *Journal of Transport Geography*, 58, 256–268. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.12.018>

- Qin, L., Peña-García, A., Leon, A. S., & Yu, J. C. (2021). Comparative study of energy savings for various control strategies in the tunnel lighting system. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(14). <https://doi.org/10.3390/app11146372>
- Rešetar, M., Pejić, G., & Lulić, Z. (2018a). Changes and trends in the Croatian road vehicle fleet – Need for change of policy measures. *Transport Policy*, 71, 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.08.005>
- Rešetar, M., Pejić, G., & Lulić, Z. (2018b). Changes and trends in the Croatian road vehicle fleet – Need for change of policy measures. *Transport Policy*, 71, 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.08.005>
- Shaneyfelt, K. M., Anderson, A. R., Kumar, P., & Hunt, W. F. (2017). Air quality considerations for stormwater green street design. *Environmental Pollution*, 231, 768–778. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.081>
- Shen, B., Ge, Y., Qu, W., Sun, X., & Zhang, K. (2018). The different effects of personality on prosocial and aggressive driving behaviour in a Chinese sample. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 56, 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.04.019>
- Sookun, A., Boojhawon, R., & Rughooputh, S. D. D. V. (2014). Assessing greenhouse gas and related air pollutant emissions from road traffic counts: A case study for Mauritius. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 32, 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.06.005>
- Szumaska, E. M., & Jurecki, R. (2020). The effect of aggressive driving on vehicle parameters. *Energies*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/en13246675>
- Tiwari, G., Jain, D., & Ramachandra Rao, K. (2016). Impact of public transport and non-motorized transport infrastructure on travel mode shares, energy, emissions and safety: Case of Indian cities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 44, 277–291. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.11.004>
- Tran, Q. H., Do, V. M., & Dinh, T. H. (2022). Traffic signal timing optimization for isolated urban intersections considering environmental problems and non-motorized vehicles by using constrained optimization solutions. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(5), 299. <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00895-9>

- Tselentis, D. I., Yannis, G., & Vlahogianni, E. I. (2017). Innovative motor insurance schemes: A review of current practices and emerging challenges. *Accident Analysis and Prevention*, 98, 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.10.006>
- Várhelyi, A., Hjalmdahl, M., Hydén, C., & Draskóczy, M. (2004). Effects of an active accelerator pedal on driver behaviour and traffic safety after long-term use in urban areas. *Accident Analysis and Prevention*, 36(5), 729–737. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2003.06.001>
- Wenzel, T. (2013). The effect of recent trends in vehicle design on U.S. societal fatality risk per vehicle mile traveled, and their projected future relationship with vehicle mass. *Accident Analysis and Prevention*, 56, 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.03.019>
- White, L., & Lee, G. J. (2009). Operational research and sustainable development: Tackling the social dimension. *European Journal of Operational Research*, 193(3), 683–692. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.057>
- WHO. (2018). *World health statistics 2018: monitoring health for the SDGs, sustainable development goals*.
- Zhang, K., Batterman, S., & Dion, F. (2011). Vehicle emissions in congestion: Comparison of work zone, rush hour and free-flow conditions. *Atmospheric Environment*, 45(11), 1929–1939. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.01.030>
- Zhu, J., & Liu, W. (2020). A tale of two databases: the use of Web of Science and Scopus in academic papers. *Scientometrics*, 123(1), 321–335. <https://doi.org/10.1007/s11192-020-03387-8>
- Zhu, M., Sze, N. N., & Newnam, S. (2022). Effect of urban street trees on pedestrian safety: A micro-level pedestrian casualty model using multivariate Bayesian spatial approach. *Accident Analysis & Prevention*, 176, 106818. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106818>