

APLICAÇÕES MATEMÁTICAS E ESTATÍSTICAS VISANDO À REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE POLUENTES EM SISTEMAS DE TRANSPORTES

Data de submissão: 16/01/2025

Data de aceite: 05/03/2025

Eduardo Valcacer Coelho

Universidade Federal de Goiás - Instituto
de Matemática e Estatística
Ex-Discente da graduação em Estatística
Goiânia - Goiás
<https://lattes.cnpq.br/4572404548692640>

Carlos Eduardo Sanches de Andrade

Universidade Federal de Goiás -
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Docente das graduações em Engenharia
de Transportes e Engenharia Civil
Aparecida de Goiânia - Goiás
<http://lattes.cnpq.br/2536969910869609>

RESUMO: O presente trabalho busca examinar diferentes formas de aplicação de métodos e modelos estatísticos e matemáticos visando à redução das emissões de poluentes em sistemas de transportes e a maior eficiência no transporte de cargas e passageiros. Foram identificados artigos com diferentes modelagens matemáticas e estatísticas aplicadas à previsão dos efeitos de alteração na matriz energética e sobre a emissão de poluentes atmosféricos. Os resultados mostram que há um grande incentivo financeiro e ambiental para implementar

esses tipos de ferramentas na engenharia de transportes e suas aplicações apresentam alta capacidade preditiva. Os dados obtidos mostram a aplicabilidade desses modelos e os ganhos de suas aplicações em diferentes contextos.

PALAVRAS-CHAVE: modelagem matemática, emissão de poluentes, matriz energética e combustíveis.

MATHEMATICAL AND STATISTICAL APPLICATIONS AIMED AT REDUCING POLLUTANT EMISSIONS IN TRANSPORTATION SYSTEMS

ABSTRACT: This study aims to examine different ways of applying statistical and mathematical methods and models to reduce pollutant emissions in transportation systems and increase efficiency in freight and passenger transportation. Articles with different mathematical and statistical models applied to predict the effects of changes in the energy matrix and on the emission of atmospheric pollutants were identified. The results show that there is a great financial and environmental incentive to implement these types of tools in transportation engineering and their applications have high predictive capacity. The data obtained show

the applicability of these models and the gains of their applications in different contexts.

KEYWORDS: mathematical modelling, pollutant emissions, energy matrix and fuel.

1 | INTRODUÇÃO

A qualidade do ar é uma preocupação crescente em muitas cidades ao redor do mundo. Poluentes atmosféricos emitidos pelos sistemas de transportes, como monóxido de carbono (CO), hidrocarboneto (HC) e óxido de nitrogênio (NOx) têm impactos negativos significativos para a saúde humana e para a existência de outros seres vivos do meio ambiente (D'Agosto, 2015). Além disso, a principal responsabilidade pelo aquecimento global é das emissões de Gases do Efeito Estufa - GEE, como metano - CH₄, e principalmente, dióxido de carbono - CO₂ (IPCC, 2022). Sistemas de transportes, especialmente veículos movidos a combustíveis fósseis, são grandes contribuidores para essas emissões de GEE e de outros poluentes atmosféricos. A quantidade de GEE emitida pelo setor de transporte do Brasil atingiu, em 2019, 200 milhões de toneladas de CO₂, correspondendo a 45,4% do total de emissões associadas à matriz energética brasileira, sendo este o setor com a maior parcela de emissões relacionadas ao uso de energia (EPE, 2020).

Em função disso, muitas nações, incluindo o Brasil, assumiram compromissos de redução de GEE no Acordo de Paris e na COP26. O Brasil confirma seu compromisso de reduzir suas emissões de GEE em 37% até 2025 e em 50% até 2030, em comparação com 2005. Os compromissos do Brasil também incluem um objetivo de longo prazo para alcançar a neutralidade de carbono até 2050 (UN, 2022).

Assim, para cumprir seus compromissos de redução de emissões é necessário que o setor de transportes se desenvolva dentro de uma perspectiva de sustentabilidade, realizando os cálculos e o acompanhamento das emissões de GEE e de outros poluentes atmosféricos oriundos pelos sistemas de transportes. A qualidade do ar e a mitigação das mudanças climáticas são desafios globais urgentes.

Consequentemente, a matemática e a estatística surgem como ferramentas poderosas para analisar e interpretar dados operacionais de sistemas de transportes que impactam no resultado final das emissões de gases do efeito estufa e de outros poluentes atmosféricos, como: horários, frequência, previsão de demanda e previsão de combustível/energia utilizado(a). Essas informações são preciosas para realizar cálculos de dados ambientais de sistemas de transportes através da estimação das emissões e suas curvas de tendências. A seguir são citadas algumas maneiras de como a estatística pode ajudar na interpretação de dados operacionais em sistemas de transportes:

- **Identificação de Padrões e Tendências:** Através de métodos estatísticos, é possível identificar padrões nos dados que podem indicar gargalos operacionais, horários de pico, e tendências de uso.
- **Análise Preditiva:** Utilizando modelos estatísticos, a estatística pode prever

eventos futuros, como a demanda de passageiros ou a necessidade de manutenção de veículos.

- **Otimização de Rotas:** A análise estatística pode ajudar a otimizar rotas de transporte, considerando fatores como tráfego, condições climáticas e custos, resultando em economia de tempo e recursos.
- **Gestão de Estoque e Recursos:** A estatística auxilia na previsão de demanda e na gestão de estoque, assegurando que os recursos estejam disponíveis onde e quando forem necessários.

Essas são apenas algumas das aplicações da estatística em sistemas de transportes, que, quando bem utilizadas, podem levar a operações mais eficientes e a uma melhor experiência para os passageiros. Considerando a importância de incrementar a previsibilidade para a otimização da gestão de transporte e impactos ambientais, o objetivo foi realizar uma discussão preliminar de publicação nacional sobre modelos matemáticos e estatísticos utilizados para realizar previsões de dados operacionais relevantes provenientes dos sistemas de transporte, que impactam no resultado das emissões de GEE e de outros poluentes atmosféricos.

Para o levantamento dos artigos foi realizada uma pesquisa bibliográfica em bases de dados científicas para identificar estudos relevantes sobre modelação estatística e sistemas de transporte e os estudos são descritos a seguir, com as possíveis implicações.

2 | RESULTADOS

Cachola *et. al.* (2022) analisaram a possibilidade de aumentar o uso de biocombustíveis para uma matriz de baixo carbono. Foi aplicado um modelo preditivo de consumo para 2020-2030 das seguintes fontes de energia no transporte rodoviário gás natural, óleo diesel, biodiesel, gasolina, etanol anidro e etanol hidratado. Os autores postularam que o consumo de energia de uma região está causalmente relacionado à sua economia e realizaram uma modelagem de regressão com o modelo MARS desenvolvido por Friedman em 1991 para cada um dos tipos de combustível, utilizando o PIB do Brasil como variável independente e o consumo de energia como variável dependente. Eles obtiveram coeficientes de determinação que variaram de 0,857 (gasolina) a 0,995 (diesel), e concluíram que os dados projetam um aumento no uso de biocombustíveis e uma redução no uso de combustíveis fósseis. Adicionalmente previram que, apesar do aumento no consumo de energia nos próximos anos, ocorrerá uma redução nas emissões de GEE.

Murta *et. al.* (2023) discutiram o uso de biodiesel como uma alternativa ao diesel de petróleo no transporte público urbano do Rio de Janeiro, visto o Brasil ser um país com alto potencial de produção de biodiesel. O estudo destaca a dependência do Brasil em relação ao transporte rodoviário e os problemas ambientais decorrentes disto, considerando que o setor de transporte representa aproximadamente 82,4% do consumo de derivados de

petróleo no Brasil, que aumentou a uma taxa substancialmente maior que o crescimento populacional a partir de 2009 (IEA, 2017). O estudo utilizou a metodologia *Top Down* desenvolvida pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 1996, cit. por Murta *et al.*, 2023) com dados da Fetranspor de 2018 para calcular a tendência de emissões de CO₂, utilizando uma regressão linear, e então usaram estes dados para projetar o consumo futuro até 2030. Para comparar o consumo de diesel e biodiesel, consideraram as regulamentações governamentais quanto à porcentagem de mistura de biodiesel e diesel, que variam de 2% em 2005 até 20% em 2030. Calcularam que esse aumento no uso de biodiesel trará uma redução de aproximadamente 38,7% nas emissões, quando comparado com o uso exclusivo do petrodiesel.

Dias *et al.* (2015) buscaram comparar o uso de diferentes modelos de emissão de poluentes integrados à modelos de tráfego, visando desenvolver uma ferramenta para a calibração do modelo de emissões para veículos transportadores de carga. O modelo de emissão escolhido pelos autores foi o modelo Panis *et al.* (2006, cit. por Dias *et al.*, 2015), que é capaz de estimar as taxas de NOx, compostos orgânicos voláteis (COV), materiais particulados (MP) e CO₂. Uma limitação do modelo é que os dados foram coletados durante pico matinal de tráfego, com baixas velocidades, colocando uma restrição na possibilidade de seu uso. Para realizar a calibração do modelo, os pesquisadores coletaram dados reais de emissões de poluentes, utilizando o sistema embarcado desenvolvido por Dias *et al.* (2014, cit. por Dias *et al.*, 2015), durante um dia típico com condições normais de tráfego. Para a calibração, utilizaram dois métodos: regressão linear com auxílio do pacote Microsoft Excel e um Algoritmo Genético desenvolvido em Python, que é um tipo de algoritmo baseado na teoria da evolução de Darwin, em que várias soluções são produzidas e as menos aptas são descartadas, refinando o algoritmo a cada geração. Considerando o CO₂, a otimização com a regressão linear com algoritmo genético obteve um erro de 0,0588% quando comparados às emissões reais. Para NOx, o algoritmo genético obteve 0,1596% de erro. Por fim, quando relativo aos materiais particulados, o algoritmo genético teve erro de 0,3831%. Para todos os poluentes, a regressão linear realizada no Excel retornou um erro de 0%, segundo os autores. O estudo concluiu que, apesar da precisão da regressão linear, ainda há razões para se usar o algoritmo genético, já que seus erros foram muito baixos, é um software de código aberto e é extremamente flexível quando comparado com o Microsoft Excel, que é pago e de código fechado.

Cursino e Machado (2023) exploraram o uso de Modelagem da Informação da Construção (*Building Information Modelling* - BIM) integrado a microssimulações de tráfego, com o objetivo de apoiar políticas de redução de carbono nas cidades. O estudo também enfoca em como o BIM pode contribuir para aumentar a eficiência de sistemas de infraestrutura de transporte, tendo usos e aplicações para melhora na receita, gestão de riscos e controle de segurança, além da possibilidade de integração tecnológica, com sistemas aéreos não tripulados, sensores, computação na nuvem, escaneamento a laser

e LiDAR (*Light Detection and Ranging*), uso de realidade virtual, GPS (*Global Positioning System*) e sistemas de informações geográficas GIS (*Geographic Information System*) (Costin *et al.*, 2018). O estudo coletou dados de tráfego de São Paulo e Recife, utilizando-os para criar matrizes de origem e destino. Usaram esses dados em conjunto com dados do *OpenStreet Map* e *Microsoft Bing Maps* para criar os modelos no *Autodesk Infracore*, refinando-os com dados municipais, como o Mapa Digital da Cidade de São Paulo e dados da Prefeitura de Recife no *ArcGIS Pro*. Para realizar as simulações, analisaram diferentes métricas, como número de viagens, tempo total e médio e emissões de CO₂ em diferentes cenários, o uso de semáforo ou rotatória em São Paulo, e, a condição atual de vias, novo empreendimento ou novo empreendimento com adição de alças de acesso em Recife. Nas simulações de São Paulo, a opção com rotatória apresentou maior fluidez de tráfego e menor média de tempo e emissão de CO₂ por viagem. A simulação realizada para Recife previu aumento no número de viagens e redução de emissão de CO₂ com a inserção das alças de acesso. Concluíram que a integração de BIM com microssimulações de tráfego permite avaliar diferentes cenários de intervenção urbana, contribuindo para a tomada de decisões em relação à redução de carbono e melhoria da mobilidade humana.

3 | DISCUSSÃO

Considerando os altos níveis de poluição e seus impactos ambientais (D'Agosto, 2015), o objetivo do trabalho foi analisar diferentes formas de modelagem e previsão de emissões de poluentes, buscando métodos científicos e estatísticos robustos para essas estimativas, visando maior facilidade de planejamentos de rotas com consumos mais baixos, além de incentivar e auxiliar na redução da poluição com a previsão de alteração na matriz energética para biocombustíveis. Nos dois casos, modelos inferenciais e estocásticos forneceram dados que dão suporte a possíveis efeitos de alterações nas interações entre poluição e as respectivas alterações.

Ao mostrar que o uso de biocombustíveis reduz a emissão de poluentes mesmo com aumento do consumo de energia, os artigos (Cachola *et al.*, 2022; Murta *et al.*, 2023) fortalecem a noção de que há benefícios ambientais de uma gradual mudança na matriz energética do país, com uma redução no uso de combustíveis fósseis.

Adicionalmente, os modelos preveem que alterações no tráfego e na engenharia de trânsito (Cursino & Machado, 2023; Dias *et al.*, 2015) também reduzem as emissões de diferentes poluentes e aumentam o fluxo e a eficiência do trânsito. No geral, diferentes modelos apresentaram altos índices de determinação com baixo erro e simulações que preveem resultados benéficos no trânsito e na emissão de poluentes.

Como limitação do presente trabalho, os estudos analisados basearam-se em poucos contextos. Estudos futuros devem abarcar diferentes situações e poluentes, com

aplicação dessas e de outras ferramentas, ampliando o nível de precisão das ferramentas e sua previsibilidade, para contribuir com mitigação dos impactos ambientais.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por fim, a diversidade de modelos utilizados nos artigos incluídos na análise mostra a maleabilidade e importância das ferramentas matemáticas e estatísticas para contribuir para a redução da poluição e aumento da eficiência do transporte, ambas consistindo em situações críticas para as condições de vida atuais e futuras, além do desenvolvimento de softwares abertos, que trazem mais flexibilidade ao pesquisador e facilitam a criação e adaptação de diferentes modelos a diferentes situações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – pela bolsa PIBIC ao primeiro autor e à Universidade Federal de Goiás – UFG – pelo suporte técnico e operacional concedido.

REFERÊNCIAS

Cachola, C., Andrade, A. C. C., & Peyerl, D. (2022). Tendências e Perspectivas para o Consumo de Combustíveis no Transporte Rodoviário Brasileiro entre 2020 e 2030. *Anais do III Simpósio Interdisciplinar de Ciência Ambiental*, p. 167-176.

Costin, A. et al. Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations. *Automation in Construction*, 94, (257-281).

Cursino, P. L. S., & Machado, F. A. (2023). BIM e microsimulação de tráfego no subsídio à redução de carbono nas cidades. *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO*, 4, 1-8.

D'Agosto, M. A. (2015) *Transporte, Uso de Energia e Impactos Ambientais*. 1ª. Ed. Rio de Janeiro, GEN LTC.

Dias, H. L. F., Macena, F. A., Azevedo, J. A. H., Bertoni, B. V., de Oliveira, M. L. M., & Cavalcante, F. S. Á. CALIBRAÇÃO DE MODELOS DE EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS PARA AUXILIAR NO PLANEJAMENTO DO TRANSPORTE URBANO DE CARGA.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (2020). *Relatório Síntese 2020*. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energeticonacional-2020>.

IEA – International Energy Agency (2017). *CO2 emissions from fuel combustion*. Disponível em https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2017/10/co2-emissions-from-fuel-combustion-2017_g1g7ca18/co2_fuel-2017-en.pdf

IPCC (2022). *International Panel on Climate Change. Climate report 2022 summary: The key findings*. Disponível em: <https://climate.selectra.com/en/news/ipcc-report-2022>.

Murta, A. L. S., de Freitas, M. A. V., & Murta, M. D. P. A. (2023). Redução de emissões de CO₂ por uso de Biodiesel na frota de ônibus urbana do Rio de Janeiro. *Revista Valore*, 8, 41-56.

UN - United Nations (2022). *Nationally determined contributions registry*. New York. Disponível em: <https://unfccc.int/NDCREG>.