

Impacto das Chuvas no Tráfego Urbano: Um Estudo de Caso na BR-104 em Alagoas

Victor A. L. Brasileiro¹, Geymerson S. Ramos^{2,1}, Andre L. L. Aquino¹

¹Orion Lab., Instituto de Computação – Universidade Federal de Alagoas (UFAL)
CEP 57.072-900 – Maceió – AL – Brasil

²Inria, INSA Lyon – CITI, UR3720
69621 Villeurbanne, França

{victor.brasileiro, geymerson, alla}@orion.ufal.br

Abstract. This study investigates how rainfall events impact vehicle flow on highway BR-104, along the section that crosses the city of Maceió, the capital of the state of Alagoas. We analyzed traffic data from the National Traffic Counting Plan and precipitation data from the National Institute of Meteorology, collected between January and December 2022. Linear regression and mean percentage error (MPE) analysis were applied to assess traffic variation on rainy days. The results showed an increase in the number of passenger vehicles and a decrease in the volume of larger vehicles.

Resumo. Este estudo investiga como a ocorrência de chuvas impacta o fluxo de veículos na rodovia BR-104, no trecho que cruza a cidade de Maceió, capital do estado de Alagoas. Analisamos dados de tráfego do Plano Nacional de Contagem de Tráfego e dados de precipitação do Instituto Nacional de Meteorologia, coletados entre janeiro e dezembro de 2022. Aplicamos regressão linear e análise do erro percentual médio (MPE) para avaliar a variação no tráfego em dias de chuva. Como resultado foi observado um aumento na quantidade de veículos de passeio e uma diminuição no volume de veículos de maior porte.

1. Introdução

O aumento populacional nos últimos anos tem intensificado os desafios enfrentados no desenvolvimento de Cidades Inteligentes [Yin et al. 2015] e na mobilidade urbana. A demanda por soluções de Sistemas de Transporte Inteligente [Meneguette et al. 2018] torna-se cada vez mais crítica. Ao considerarmos os efeitos de adversidades climáticas, sobretudo em dias com ocorrência de chuvas intensas, o fluxo de veículos tende a apresentar alterações significativas em seu padrão [Dhaliwal et al. 2017].

Pesquisas demonstram que a intensidade da chuva pode afetar diretamente a capacidade viária e os padrões de deslocamento [Wang and Luo 2017, Qi et al. 2020]. Além disso, condições como neve e frio extremo também influenciam o tráfego, como evidenciado no estudo conduzido no Canadá por pesquisadores da *University of Regina* [Datla et al. 2013], que identificaram reduções significativas no volume de veículos, especialmente de passeio, durante episódios de neve intensa.

Apesar da crescente produção científica internacional sobre os efeitos do clima na mobilidade urbana, ainda são escassos os estudos que abordam esse fenômeno no con-

texto brasileiro. Analisar os impactos das chuvas sobre o tráfego em vias urbanas nacionais é fundamental para preencher essa lacuna e apoiar decisões mais contextualizadas e eficazes. Eventos de precipitação no Brasil tendem a estressar sistemas de escoamento urbano, e recorrentemente causam situações de alagamento e transtorno em diversas cidades do País, resultando inclusive em situações de calamidade [Pillar and Overbeck 2024].

Nesse sentido, este estudo tem como objetivo avaliar de que forma a ocorrência de chuvas impacta o fluxo de diferentes categorias de veículos na rodovia BR-104, um trecho de alto fluxo que cruza a cidade de Maceió, capital do estado de Alagoas. Utilizamos dados de tráfego veicular disponibilizados pelo Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT) [DNIT 2022], enquanto os dados climáticos foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) [INMET 2022].

Nossa contribuição se dá na aplicação de uma metodologia capaz de analisar o impacto da precipitação sobre o tráfego urbano, com o intuito de identificar vias mais afetadas e subsidiar ações públicas voltadas à melhoria da mobilidade. Para isso, utilizamos um modelo de regressão linear que estima o fluxo veicular em dias sem chuva, comparando os valores previstos aos dados reais de dias chuvosos por meio da métrica MPE (*Mean Percentage Error*). A análise foi segmentada por categoria de veículo, permitindo avaliar os efeitos da chuva sobre diferentes modais. O restante deste artigo discute os trabalhos relacionados na Seção 2, apresenta a metodologia na Seção 3 e, por fim, os resultados e a conclusão nas Seções 4 e 5.

2. Trabalhos Relacionados

A influência da chuva sobre o tráfego urbano tem despertado interesse na comunidade científica, especialmente por seu impacto direto na eficiência e segurança da circulação viária. Diferentes abordagens têm explorado como a precipitação altera padrões de deslocamento, variando conforme o contexto urbano, a infraestrutura disponível e o tipo de modal predominante. Nesse sentido, diversos trabalhos investigam os efeitos de condições climáticas adversas sobre o fluxo de tráfego, como a proposta de Qi et al. [Qi et al. 2020]. Os autores analisam de que forma fatores meteorológicos influenciam a mobilidade urbana em dimensões espaciais e temporais. Para isso, utilizam dados provenientes de controladores de sinalização de tráfego e registros meteorológicos da cidade de Brisbane, Austrália.

Com base em dados de tráfego e registros de precipitação coletados em uma rodovia da província de Hainan, Wang e Luo [Wang and Luo 2017] quantificaram a influência da chuva sobre o comportamento do fluxo de automóveis. O estudo analisou variáveis como densidade de tráfego, velocidade média e intensidade das chuvas. Além disso, por meio de análise de regressão, os autores definiram um coeficiente climático capaz de associar a intensidade da precipitação e a visibilidade aos parâmetros do modelo. Os resultados demonstram que o aumento da intensidade da chuva impacta diretamente a capacidade máxima da via e a velocidade de fluxo livre, evidenciando como fatores climáticos alteram de forma significativa a dinâmica do tráfego rodoviário.

Diante do progresso das técnicas de aprendizado profundo, surgiram modelos capazes de lidar simultaneamente com séries temporais e variáveis climáticas. Jia et al.

[Jia et al. 2017] exploraram redes do tipo *Deep Belief Network* (DBN) e *Long Short-Term Memory* (LSTM) na previsão do fluxo de tráfego, considerando o impacto das chuvas. O estudo avalia a capacidade desses modelos em integrar dados climáticos e aprender os padrões de tráfego em diferentes cenários de chuva. Os resultados indicam que a inclusão de variáveis meteorológicas contribui significativamente para o aumento da acurácia nas predições, favorecendo uma análise mais precisa e eficiente do comportamento viário em condições climáticas adversas.

Além dos estudos que abordam os efeitos da chuva sobre a mobilidade urbana, destacam-se também pesquisas que investigam o impacto de outras condições climáticas, como a neve. Em um estudo realizado no Canadá, pesquisadores da *University of Regina* analisaram dados de tráfego e clima coletados entre 1995 e 2010, com o objetivo de compreender como o frio extremo e a neve influenciam o volume de tráfego nas rodovias da província de Alberta [Datla et al. 2013]. Os resultados indicaram uma redução significativa no volume total de veículos, sendo os automóveis de passeio mais afetados pelas condições adversas do que os caminhões.

Em estudo conduzido na região noroeste da Espanha, pesquisadores analisaram o impacto de diferentes condições climáticas, como chuva, neve, velocidade do vento e perda de visibilidade, sobre a velocidade do tráfego [Camacho et al. 2010]. Os resultados indicaram que tanto a chuva quanto a neve provocam reduções na velocidade média dos veículos, sendo os efeitos da neve substancialmente mais severos. Esse estudo reforça a importância de considerar variáveis meteorológicas específicas na modelagem do comportamento viário e destaca a necessidade de incluir características geográficas no planejamento de futuras pesquisas.

No contexto de desastres naturais, Giardini et al. [Giardini et al. 2023] propuseram uma abordagem baseada em séries temporais para estimar deslocamentos populacionais após desastres naturais, utilizando registros agregados de chamadas telefônicas. A partir da previsão do número de dispositivos móveis esperados em condições normais e sua comparação com os valores reais observados após o evento, os autores definiram a métrica MPE (*Mean Percentage Error*) como indicador das variações de mobilidade. Essa metodologia permitiu quantificar de forma objetiva o impacto dos terremotos na presença populacional, demonstrando o potencial do uso de dados agregados para análise de mobilidade em cenários de crise.

Apesar da crescente produção científica internacional sobre os efeitos do clima na mobilidade urbana, ainda são escassos os estudos no contexto brasileiro. Considerando que as chuvas causam transtornos e perdas recorrentes em diversas cidades brasileiras, este trabalho analisa seus impactos sobre o tráfego em uma via urbana nacional, especificamente no trecho da rodovia BR-104 que cruza a cidade de Maceió, capital do estado de Alagoas.

3. Metodologia

Nossa análise considera o volume e 4 categorias de veículos que trafegam pela rodovia BR-104, ilustrada na Figura 1. O trecho possui aproximadamente 25 quilômetros e cruza a cidade de Maceió, com cerca de 994 mil habitantes [IBGE 2024]. Serão utilizados dados do Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT) [DNIT 2022], dados

climáticos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) [INMET 2022] e o método de estimativa de mobilidade desenvolvido por Giardini et al. [Giardini et al. 2023], com o objetivo de avaliar o impacto das chuvas no trecho da rodovia selecionada.

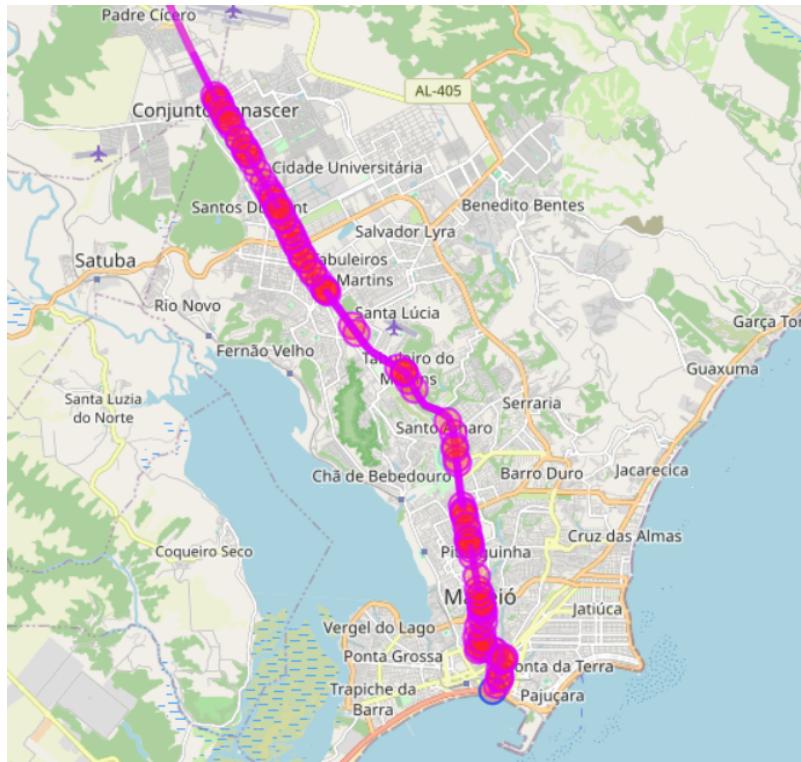


Figura 1. Trecho da rodovia BR-104, destacado em rosa, cruzando a cidade de Maceió.

3.1. Conjuntos de Dados

Os dados analisados foram coletados entre janeiro e dezembro de 2022, no trecho da rodovia BR-104. As informações de tráfego fornecidas pelo PNCT [DNIT 2022] estão organizadas em séries temporais diárias, e segmentadas por categorias de veículos, das quais selecionamos as quatro categorias com maior representatividade no tráfego urbano: ônibus/caminhão de 2 eixos, ônibus/caminhão de 3 eixos, automóveis de passeio e motocicletas. As seguintes variáveis estão disponíveis: data e horário da medição, sentido do fluxo, dia da semana e o volume de veículos para cada uma das categorias analisadas.

Os dados climáticos são disponibilizados pelo INMET [INMET 2022], com foco na média horária de precipitação registrada em cada dia do ano. Essas informações foram integradas aos dados de tráfego por meio da data e hora correspondente. Com isso, foi possível formar um único conjunto de dados, no qual o volume de veículos está diretamente relacionado à presença (ou ausência) de chuva em cada dia. Essa combinação permitiu observar de forma mais clara como as condições climáticas interferem no comportamento do tráfego ao longo do tempo.

3.2. Análise de Fluxo de Automóveis

O gráfico da Figura 2 exibe a quantidade média de veículos por hora, para cada categoria, onde é possível perceber que, ao longo do dia, os automóveis de passeio representam a

maior parcela do tráfego na rodovia analisada. Em seguida, com volume consideravelmente inferior, destacam-se as motocicletas. Outro ponto relevante é a identificação dos horários de pico médio, que ocorrem por volta das 7h da manhã e das 17h da tarde, sugerindo uma concentração mais intensa de veículos durante os períodos típicos de deslocamento para o trabalho e retorno para casa. Outro aspecto relevante diz respeito à grande disparidade entre os modais individuais e coletivos. A soma dos fluxos de veículos de passeio e motocicletas representa um volume quase cinco vezes superior ao dos veículos de transporte coletivo, como ônibus e caminhões.

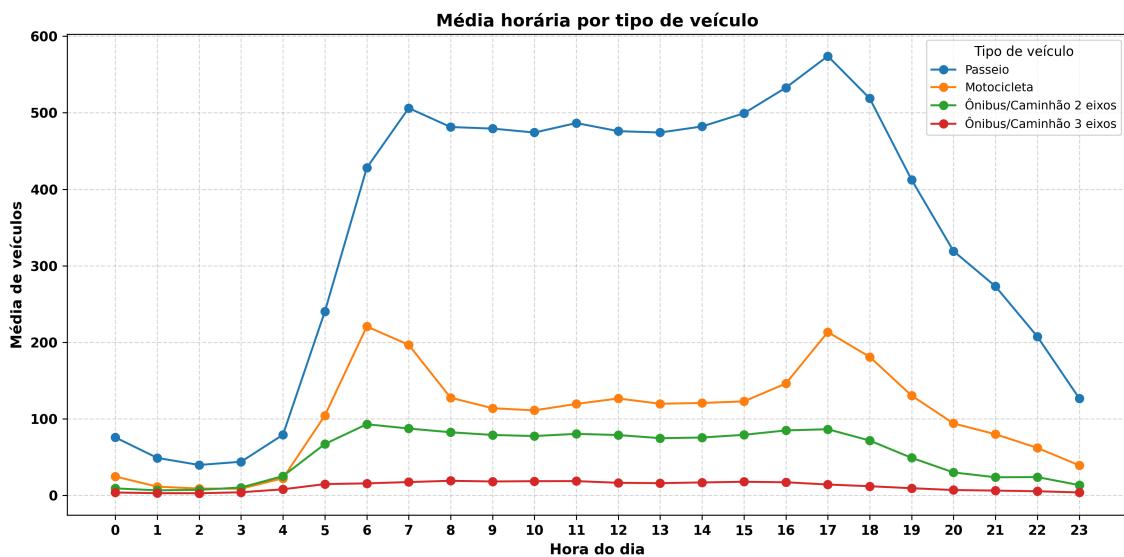


Figura 2. Quantidade média de veículos ao longo do dia, segmentada por categoria de automóvel.

A Figura 3 revela que os veículos de passeio e as motocicletas são as principais categorias que compõem o tráfego ao longo da semana, apresentando dois picos distintos de movimentação: no início da manhã (entre 7h e 9h) e no fim da tarde (entre 17h e 19h). No entanto, esse padrão se altera nos fins de semana. Aos sábados e domingos, os veículos de passeio registram um aumento de volume mais tardio, com maior concentração no período vespertino. Destaca-se, ainda, a intensificação do tráfego entre 17h e 19h nas sextas-feiras e domingos, superando a média observada nesse mesmo horário nos demais dias da semana.

Em contraste, ônibus e caminhões mantêm um fluxo relativamente estável durante os dias úteis, mas apresentam uma queda significativa nos finais de semana, especialmente aos domingos. Essa discrepância evidencia a predominância do transporte individual no cotidiano urbano, particularmente fora do horário comercial e em períodos de lazer. Isso pode ser um indicativo da necessidade de políticas públicas mais eficazes voltadas à valorização e ampliação do transporte coletivo para reduzir congestionamentos.

3.3. Modelo Preditivo de Impacto de Precipitação

Nossa análise do impacto da precipitação em rotas urbanas baseia-se na proposta de Giardini et al. [Giardini et al. 2023], que definem a métrica de Estimativa de Mobilidade, ou em inglês, *Mobile Presence Estimate* (MPE). Os autores analisaram os impactos de desastres naturais no deslocamento populacional, utilizando dados agregados de chamadas

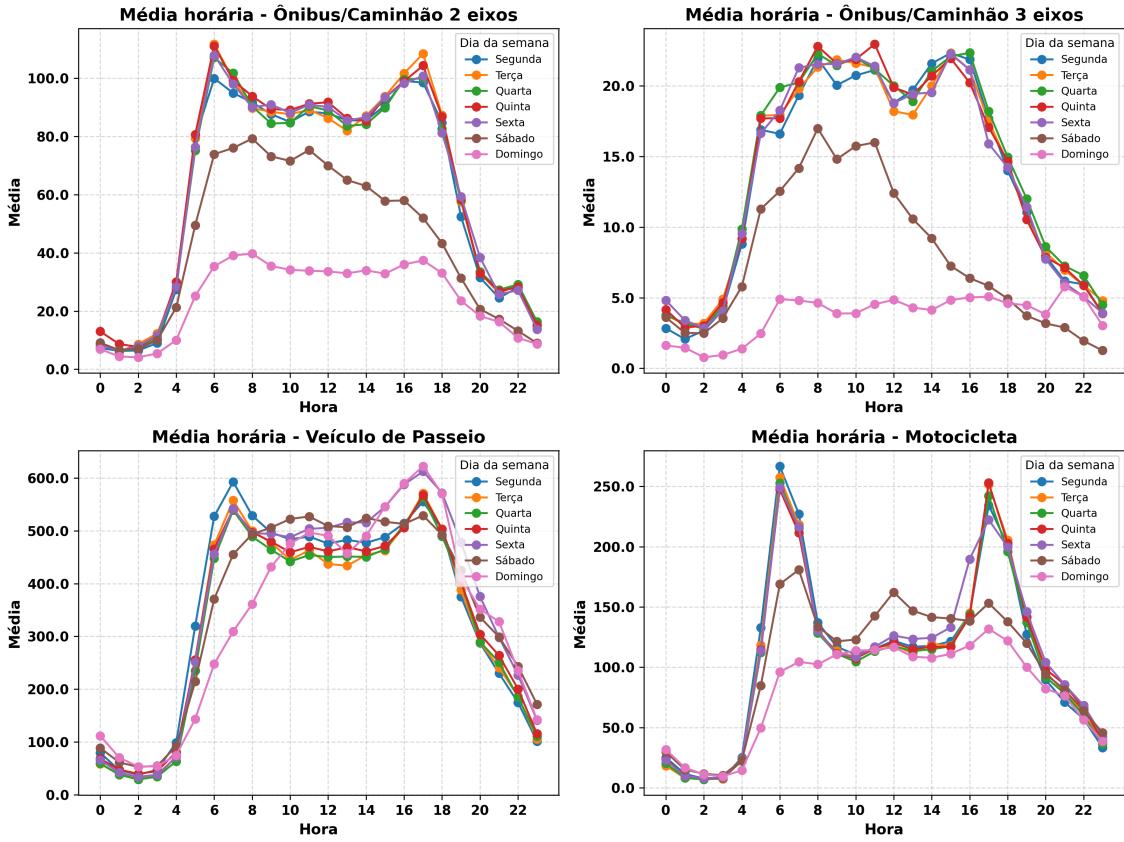


Figura 3. Contagem média de veículos por hora, em diferentes dias da semana, para as 4 categorias de veículo.

telefônicas referentes a quatro regiões italianas afetadas por terremotos de alta magnitude entre 2016 e 2017. A partir de modelos preditivos, compararam a quantidade de dispositivos móveis em circulação após os desastres com uma estimativa gerada anteriormente aos eventos sísmicos. Por meio da comparação dos valores preditos \hat{y}_t e dos valores reais y_t na Equação (1), o MPE indica a variação na presença desses dispositivos, permitindo identificar se houve aumento, redução ou estabilidade na mobilidade populacional.

$$\text{MPE} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{y_t - \hat{y}_t}{\hat{y}_t} \quad (1)$$

A proposta de Giardini et al. [Giardini et al. 2023] emprega um modelo de Regressão Linear por Mínimos Quadrados Ordinários [Dismuke and Lindrooth 2006] para realizar as previsões requeridas no cálculo do MPE. Dessa forma, empregamos o modelo de regressão linear definido na Equação (2), disponível em [Pedregosa et al. 2011], que prevê um valor de saída (\hat{y}_t) no tempo t , com base em uma combinação linear de um termo independente w_0 , dos pesos $\mathbf{w} = \{w_1, w_2, \dots, w_p\}$ a serem encontrados para o modelo, e das variáveis de entrada $X = \{x_1, x_2, \dots, x_p\}$.

$$\hat{y}_t = w_0 + w_1 x_1 + \cdots + w_p x_p \quad (2)$$

As previsões da Equação 2 são utilizadas para comparação de tráfego de automóveis entre dias chuvosos e dias sem chuva. Para mensurar o impacto da precipitação

sobre o tráfego, estima-se o fluxo de veículos em dias sem chuva. Todas as variáveis diretamente relacionadas à precipitação são removidas dos dados utilizados no ajuste do modelo. Com a aplicação da Equação (1) do MPE, a série temporal predita $\hat{Y} = \{\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_N\}$ para o tráfego em um dia sem chuva é comparada ao tráfego real de um dia chuvoso, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$.

Valores positivos do MPE indicam que o fluxo real (com chuva) foi superior ao fluxo previsto (sem chuva), sugerindo um aumento na circulação de veículos em dias chuvosos. Valores negativos, por outro lado, indicam que o tráfego real foi inferior ao estimado, apontando uma possível redução na mobilidade devido à chuva. Já valores próximos de zero sugerem que a precipitação não teve impacto significativo no volume de veículos. Essa análise permite avaliar, de forma objetiva, como as condições climáticas influenciam o tráfego urbano.

4. Resultados

A Figura 4 ilustra os resultados de uma amostra dos valores previstos para dias sem chuva, $\hat{Y} = \{\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_N\}$, representados em laranja, e os valores reais de tráfego em dias chuvosos, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$, representados em azul. Um modelo linear é ajustado separadamente para cada uma das quatro categorias veiculares analisadas. De modo geral, observa-se que o modelo de regressão linear apresentou desempenho satisfatório, com margens de erro percentual médio (MPE) relativamente baixas, conforme indicado na Tabela 1. O *p*-valor é resultante do teste não paramétrico de Wilcoxon [McCrum-Gardner 2008], para verificar se as diferenças entre os volumes reais (em dias com chuva) e os volumes previstos (sem chuva) são estatisticamente significativas.

Tabela 1. Erro Percentual Médio (MPE) por categoria de veículo.

Categoria	MPE (%)	<i>p</i> -valor
Veículo de Passeio	+6,35	<i>p</i> = 0,007
Ônibus/Caminhão 2 Eixos	+5,83	<i>p</i> < 0,001
Ônibus/Caminhão 3 Eixos	-2,54	<i>p</i> = 0,005
Motocicleta	+2,24	<i>p</i> < 0,001

Todos os *p*-valores estão abaixo de 0,05, o que indica que em todas as categorias houve diferença estatisticamente significativa entre o volume real (com chuva) e o previsto (sem chuva). Para os veículos de passeio, o meio de locomoção mais numeroso, observa-se um MPE positivo. Esse resultado indica que, em dias de chuva, há um aumento considerável na quantidade de automóveis circulando na BR-104, em comparação aos dias sem chuva utilizados como referência para a previsão.

Como se trata de uma via principal importante que cruza a cidade, esse comportamento pode estar associado a fatores como alagamentos em vias secundárias, o que acaba redirecionando o tráfego para as rodovias principais. A mesma variação positiva é observada nas categorias Ônibus/Caminhão 2 Eixos e Motocicleta, embora esta última tenha uma contribuição menos significativa.

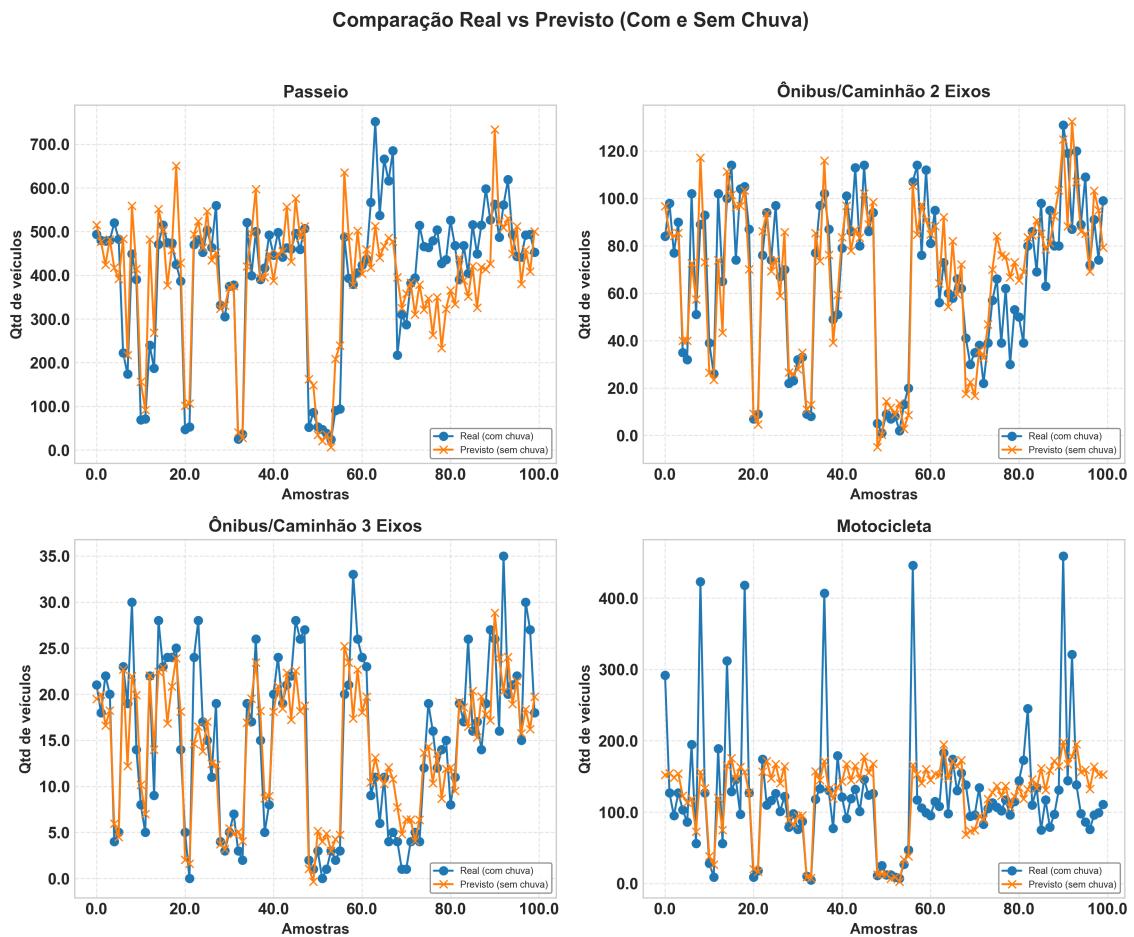


Figura 4. Gráficos gerados para cada categoria veicular, comparando os dados reais (com chuva) e as previsões do modelo ajustado com dados de dias sem chuva.

Diferindo das demais categorias, Ônibus/Caminhão 3 Eixos apresentou um MPE negativo. Esse resultado pode ser consequência da redução na circulação desse tipo de veículo em dias chuvosos, possivelmente associada a risco de acidentes ou à priorização de rotas mais seguras e estratégicas para o transporte de carga pesada.

Os resultados obtidos evidenciam oportunidades de uso estratégico dessas informações por órgãos de trânsito e defesa civil, ao mesmo tempo em que levantam hipóteses relevantes sobre o comportamento da mobilidade urbana em dias chuvosos. O aumento no fluxo de veículos leves pode estar associado à preferência por deslocamentos individuais em detrimento do transporte coletivo.

Por outro lado, a redução no tráfego de veículos pesados sugere uma reação preventiva por parte de operadores logísticos, que evitam o tráfego em vias com maior risco de alagamento ou acidentes, priorizando rotas mais seguras. Com base nesses padrões, gestores públicos podem antecipar intervenções como a realocação de agentes de trânsito, ajustes em sistemas semafôricos, emissão de alertas à população e até mesmo a reprogramação de rotas de transporte de carga. A integração de modelos preditivos com sistemas de monitoramento climático pode, assim, otimizar a aplicação de recursos

públicos e melhorar a capacidade de resposta em eventos de precipitação intensa.

5. Conclusão

Neste trabalho, avaliamos o impacto da ocorrência de chuvas sobre o tráfego de diferentes categorias de veículos na rodovia BR-104. Utilizamos um modelo de regressão linear para prever os valores de tráfego de automóveis em dias sem chuva, os quais foram comparados às quantidades reais observadas em dias chuvosos. Os resultados indicam um aumento no fluxo de veículos na rodovia BR-104, sugerindo seu uso como via alternativa diante da intransitabilidade de vias secundárias, possivelmente afetadas por alagamentos. Os veículos da categoria Ônibus/Caminhão 3 Eixos foram os únicos a apresentar redução no fluxo estimado, uma possível consequência da menor circulação desse tipo de veículo em dias chuvosos, seja pelo risco de acidentes, ou pela priorização de rotas mais seguras para o transporte de carga pesada.

Entender a influência do clima sobre o trânsito é um aspecto crucial para o planejamento de cidades, especialmente no avanço de soluções voltadas à mobilidade e Sistemas de Transporte Inteligente. Os dados apontam para um aumento do tráfego em dias chuvosos na rodovia em análise. Isso indica uma necessidade de ações públicas preventivas no sistema de drenagem das rotas alternativas. A distinção entre os efeitos da chuva em veículos individuais e coletivos também oferece subsídios para pensar intervenções segmentadas, mais eficientes e contextualizadas, especialmente em áreas com baixa adesão ao transporte público.

Como trabalhos futuros, pretendemos utilizar dados provenientes de múltiplas vias de uma mesma cidade, aplicando os métodos preditivos com o objetivo de obter uma visão mais abrangente do impacto da precipitação no contexto urbano. Consideramos também a aplicação de modelos de aprendizado de máquina mais robustos, bem como a incorporação de variáveis relacionadas à intensidade e duração da chuva, visando aumentar a precisão das previsões para otimizar a aplicação de recursos governamentais em infraestrutura urbana de transporte.

Agradecimentos

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL), pelos recursos concedidos por meio do edital E:60030.0000000352/2021, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro por meio do projeto de número 407515/2022-4.

Referências

- Camacho, F. J., García, A., and Belda, E. (2010). Analysis of impact of adverse weather on freeway free-flow speed in spain. *Transportation Research Record*, pages 150–159.
- Datla, S., Sahu, P., Roh, H.-J., and Sharma, S. (2013). A comprehensive analysis of the association of highway traffic with winter weather conditions. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104:497–506.
- Dhaliwal, S. S., Wu, X., Thai, J., and Jia, X. (2017). Effects of rain on freeway traffic in southern california. *Transportation Research Record*, 2616(1):69–80.

- Dismuke, C. and Lindrooth, R. (2006). Ordinary least squares. *Methods and designs for outcomes research*, 93(1):93–104.
- DNIT (2022). Plano nacional de contagem de tráfego - dados de 2022. <https://servicos.dnit.gov.br/dadospnt/mapa>. Acesso em: 04 jun. 2025.
- Giardini, F., Hadjidimitriou, N. S., Mamei, M., Bastardi, G., Codeluppi, N., and Pancotto, F. (2023). Using mobile phone data to map evacuation and displacement: a case study of the central italy earthquake. *Scientific Reports*, 13.
- IBGE (2024). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/al/maceio.html>. Acesso em: 14 jul. 2025.
- INMET (2022). Instituto nacional de meteorologia - dados históricos de precipitação. <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 04 jun. 2025.
- Jia, Y., Wu, J., and Xu, M. (2017). Traffic flow prediction with rainfall impact using a deep learning method. *Journal of Advanced Transportation*, 2017.
- McCrum-Gardner, E. (2008). Which is the correct statistical test to use? *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 46(1):38–41.
- Meneguette, R. I., De Grande, R., and Loureiro, A. (2018). Intelligent transport system in smart cities. *Cham: Springer International Publishing*.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., et al. (2011). Scikit-learn: Machine learning in python. *the Journal of machine Learning research*, 12:2825–2830.
- Pillar, V. D. and Overbeck, G. E. (2024). Learning from a climate disaster: The catastrophic floods in southern brazil. *Science*, 385(6713):eadr8356.
- Qi, Y., Zheng, Z., and Jia, D. (2020). Exploring the spatial-temporal relationship between rainfall and traffic flow: A case study of brisbane, australia. *Sustainability (Switzerland)*, 12.
- Wang, Y.-Q. and Luo, J. (2017). Study of rainfall impacts on freeway traffic flow characteristics. *Transportation Research Procedia*, 25:1533–1543. World Conference on Transport Research – WCTR 2016, Shanghai.
- Yin, C., Xiong, Z., Chen, H., Wang, J., Cooper, D., and David, B. (2015). A literature survey on smart cities. *Science China. Information Sciences*, 58(10):1–18.