



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

**PAULO BRUNO SOUZA NUNES**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA FISCALIZAÇÃO ELETRÔNICA DE  
VELOCIDADE E DE AVANÇO SEMAFÓRICO NA SEGURANÇA VIÁRIA: UM  
ESTUDO ANTES E DEPOIS UTILIZANDO O MÉTODO EMPÍRICO DE BAYES**

**FORTALEZA**

**2024**

PAULO BRUNO SOUZA NUNES

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA FISCALIZAÇÃO ELETRÔNICA DE VELOCIDADE E  
DE AVANÇO SEMAFÓRICO NA SEGURANÇA VIÁRIA: UM ESTUDO ANTES E  
DEPOIS UTILIZANDO O MÉTODO EMPÍRICO DE BAYES

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof. Ph.D. Flávio José Craveiro Cunto.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

N927a Nunes, Paulo Bruno Souza.

Avaliação do impacto da fiscalização eletrônica de velocidade e de avanço semafórico na segurança viária :  
Um estudo antes e depois utilizando o método empírico de Bayes / Paulo Bruno Souza Nunes. – Fortaleza, 2024.  
82 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2024.  
Orientação: Prof. Dr. Flávio José Craveiro Cunto.

1. Segurança viária. 2. Método Empírico de Bayes. 3. Volume Diário Médio Anual. 4. Krigagem  
universal. I. Título.

CDD 388

---

PAULO BRUNO SOUZA NUNES

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA FISCALIZAÇÃO ELETRÔNICA DE VELOCIDADE E  
DE AVANÇO SEMAFÓRICO NA SEGURANÇA VIÁRIA: UM ESTUDO ANTES E  
DEPOIS UTILIZANDO O MÉTODO EMPÍRICO DE BAYES

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes.

Aprovada em: 28/08/2024.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Ph.D. Flávio José Craveiro Cunto (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Ph.D. Manoel Mendonça de Castro Neto  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profª D.Sc. Christine Tessele Nodari  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

A Deus, por me proporcionar este momento.  
Aos meus pais, Cecília e Edmar, que sempre  
investiram na minha formação. À minha  
esposa Érica e ao pequeno Gael.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, cuja graça e orientação constante foram fundamentais ao longo deste trabalho.

Aos meus queridos pais, Cecília e Edmar, agradeço por todo o amor, apoio e sacrifícios ao longo desta jornada.

À minha esposa, Érica, pelo constante apoio e compreensão ao longo deste caminho acadêmico. Sua presença foi fundamental para minha motivação e sucesso.

Ao amigo e Prof. Flávio Cunto, meu orientador, agradeço pelo estímulo, orientação e confiança em minha capacidade acadêmica, possibilitando as oportunidades essenciais para o progresso desta pesquisa.

Aos professores da banca examinadora de qualificação e defesa, Prof. Manoel de Castro Neto e Profª. Christine Nodari, agradeço pela atenção dedicada, colaboração valiosa e interesse demonstrado durante todo o processo.

À Universidade Federal do Ceará (UFC) e a todos os professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN).

À Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC), principalmente ao Controle de Tráfego em Área de Fortaleza (CTAFOR), na pessoa do Lélio Ivo, pela disponibilização dos dados e pela oportunidade de poder contribuir nesta árdua tarefa de tornar o trânsito de nossa cidade mais seguro e consciente.

Aos amigos das turmas de 2021 e 2022 do PETRAN, pela convivência e apoio ao longo do período de mestrado.

Aos meus parceiros de pesquisa e amigos, Altanizio, Gabriela, Marco Antônio e Alan Coelho, pelas reflexões, discussões e ajuda ao longo do processo de elaboração desta pesquisa.

Àquele que, com seu apoio direto e indireto, trouxe serenidade, confiança e esperança ao longo desta jornada.

## RESUMO

Estratégias automatizadas de fiscalização são frequentemente implementadas em cruzamentos semaforizados para reduzir sinistros de trânsito. O impacto real dessas estratégias pode variar entre diferentes jurisdições e exige estudos observacionais que enfrentem desafios metodológicos, como a regressão à média e limitações temporais. Este estudo investiga os efeitos da fiscalização eletrônica de velocidade e avanço semafórico em interseções semaforizadas na segurança viária, utilizando o Método Empírico de Bayes (EB). A análise abrange o período de 2010 a 2019 e desenvolveu uma Função de Desempenho de Segurança Viária (FDSV) para os acidentes com vítimas de 2011, levando em consideração o fluxo veicular (VDMA) e o número de faixas, com base em uma amostra de 176 interseções em Fortaleza. Para estimar valores faltantes de VDMA, foram aplicadas a técnica de Krigagem Universal e fatores de expansão. A FDSV de 2011 foi ajustada para os anos seguintes usando a correção do intercepto proposta pelo Highway Safety Manual. Os resultados mostraram uma redução de 21% (8% a 33%; IC=95%) nos sinistros com vítimas feridas e fatais, semelhante ao encontrado com um grupo de comparação e ligeiramente superior à literatura internacional. A metodologia reforça a eficácia dos dispositivos de fiscalização em interseções semaforizadas e aprimora os estudos observacionais do tipo “antes” e “depois” no Brasil.

**Palavras-chave:** segurança viária; método empírico de Bayes; volume diário médio anual; krigagem universal.

## ABSTRACT

Automated enforcement strategies are commonly employed at signalized intersections to reduce crashes. The real impact of these strategies can vary between jurisdictions and requires observational studies that address methodological challenges such as regression to the mean and temporal limitations. This study examines the effects of electronic speed and red-light camera enforcement on traffic safety at signalized intersections using the Empirical Bayes (EB) Method. Analyzing data from 2010 to 2019, a Safety Performance Function (SPF) for 2011 crashes involving injuries was developed based on traffic volume (VDMA) and the number of lanes, using a sample of 176 intersections in Fortaleza. To estimate missing VDMA values, Universal Kriging and expansion factors were applied. The 2011 SPF was adjusted for subsequent years using the intercept correction method proposed in the Highway Safety Manual. Results indicated a 21% reduction (8% to 33%; 95% CI) in crashes with injury and fatality, similar to findings with a comparison group and slightly better than the international literature. This methodology supports the effectiveness of enforcement devices at signalized intersections and improves observational “before” and “after” studies in the Brazilian context.

**Keywords:** road safety; empirical bayes method; annual average daily traffic; universal kriging.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma das etapas do método .....	32
Figura 2 – Locais das Interseções .....	44
Figura 3 – (a) VDMA em 325 interseções de Fortaleza; (b) Somatória do número de faixas por interseção; (c) Presença de semáforo nas interseções; (d) Amostras de calibração e validação.....	46
Figura 4 – (a) variação espacial do erro em porcentagem; (b) estimativa do VDMA em interseções não amostradas a partir de Krigagem Universal .....	48
Figura 5 – Cure plot - Modelo 02 .....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Estudos com EAD/MEB na literatura .....	23
Tabela 2 –	Informações das Interseções e Instalação de Fiscalização Eletrônica .....	42
Tabela 3 –	Resultados de Krigagem Universal para a modelagem do VDMA em interseções.....	47
Tabela 4 –	RMSE da Krigagem Universal para a modelagem do VDMA em interseções entre 2010 a 2019.....	49
Tabela 5 –	Valores de $Cx$ para cada ano .....	51
Tabela 6 –	Valores do Intercepto para cada ano da FDSV .....	52
Tabela 7 –	Valores de $\lambda(j)$ , $\pi(j)$ , VAR $\{\lambda(j)\}$ e VAR $\{\pi(j)\}$ para as 36 interseções analisadas – EAD/MEB .....	54
Tabela 8 –	Valores de $\lambda(i)$ , $\pi(i)$ , VAR $\{\lambda(i)\}$ e VAR $\{\pi(i)\}$ para as 36 interseções analisadas – EAD/Naïve.....	58
Tabela 9 –	Resultados dos métodos empregados nos estudos antes e depois .....	61
Tabela 10 –	Resultados dos métodos empregados nos estudos antes e depois com intervalo de confiança e desvio padrão .....	62
Tabela A.1 –	Interseções escolhidas, data de instalação e desinstalação DFE, Sinistros Antes e Depois e Número de Faixas.....	77
Tabela A.2 –	VDMA por ano.....	78
Tabela A.3 –	Sinistros observados e meses do período “antes”.....	79
Tabela A.4 –	Sinistros previstos e parâmetros do método 4 etapas.....	80
Tabela A.5 –	Sinistros e meses do período “depois”.....	81
Tabela A.6 –	Sinistros previstos período “depois”.....	82

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CTA	Controle de Tráfego em Área
EAD/GC	Estudos “Antes” e “Depois” com o Método Grupo de Comparação
EAD/MEB	Estudos “Antes” e “Depois” com o Método Empírico de Bayes
EAD/ <i>Naïve</i>	Estudos “Antes” e “Depois” com o Método <i>Naïve</i>
FDSV	Função de Desempenho da Segurança Viária
FMS	Fator Modificador de Sinistros
HSM	Highway Safety Manual
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
VDMA	Volume Diário Médio Anual

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	Contextualização.....	13
1.2	Objetivos.....	16
1.3	Estrutura da Pesquisa.....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>18</b>
2.1	Estudos Observacionais na Segurança Viária.....	18
	<i>2.1.1 EAD/NAÏVE.....</i>	19
	<i>2.1.2 EAD/GC.....</i>	21
	<i>2.1.3 EAD/MEB.....</i>	22
2.2	Transferência Temporal e Calibração de Funções de Desempenho da Segurança Viária.....	24
2.3	Estimativa de Fluxo Médio Diário Anual.....	26
	<i>2.3.1 Imputação de Dados.....</i>	27
	<i>2.3.2 Krigagem e a Imputação de Volumes Veiculares.....</i>	28
<b>3</b>	<b>MÉTODO.....</b>	<b>32</b>
3.1	Consolidação dos Dados de Sinistros e Volumes Veiculares.....	32
3.2	Estimação do Fluxo Veicular para a Série Histórica.....	34
3.3	Coleta e Tratamento dos Dados de Sinistros – Vítimas Feridas e Fatais.....	36
3.4	Estimação das Funções de Desempenho da Segurança Viária para o período 2010 a 2019.....	37
3.5	Aplicação do Método Empírico de Bayes.....	37
3.6	Análise Comparativa.....	40

<b>4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA EM INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS COM FISCALIZAÇÃO ELETRÔNICA DE VELOCIDADE E AVANÇO SEMAFÓRICO EM FORTALEZA/CE.....</b>	<b>42</b>
4.1 Seleção das Interseções.....	42
4.2 Interpolação de Dados de Volume Veicular – Krigagem Universal.....	44
4.3 Desenvolvimento e Calibração das Funções de Desempenho da Segurança Viária.....	50
4.4 Aplicação do EAD/MEB.....	52
4.5 Aplicação do EAD/ <i>Naïve</i> .....	57
4.6 Aplicação do EAD/GC.....	59
<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>64</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>68</b>
<b>ANEXO A – TABELA COM INTERSEÇÕES ESCOLHIDAS, DATA DE INSTALAÇÃO E DESINSTALAÇÃO DFE, SINISTROS ANTES E DEPOIS, E NÚMERO DE FAIXAS.....</b>	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS) (2023), anualmente, cerca de 1,35 milhão de pessoas chegam a óbito e aproximadamente 50 milhões sofrem ferimentos ou adquirem alguma sequela como consequência de sinistros de trânsito. Diante desse cenário global, a segurança viária assume um papel estratégico na busca por redução de suas ocorrências.

A incidência de sinistros de trânsito está diretamente relacionada às características das interseções de uma rede viária, pois esses pontos são locais onde ocorre o cruzamento de trajetórias veiculares, aumentando o número de movimentos conflitantes e, consequentemente, as chances de ocorrência de sinistros. De acordo com Elvik (2011), o desrespeito às leis de trânsito é um dos comportamentos mais comuns e está significativamente associado a um risco aumentado de colisões e ferimentos no trânsito. No entanto, além do comportamento dos condutores, as características das interseções também contribuem para ocorrências de sinistros de trânsito. Segundo Penã (2011), esses eventos estão relacionados às características geométricas do cruzamento, ao uso e ocupação do solo e aos aspectos operacionais da região, como o controle de tráfego.

De acordo com Al-Ghamdi (2003), um estudo realizado em Riyadh, Arábia Saudita, revelou que cerca de 50% dos sinistros de trânsito ocorreram em interseções, e a maioria desses sinistros são de alta severidade. Fatores como excesso de velocidade e avanço de sinal vermelho são frequentemente responsáveis por esses sinistros (Goldenbeld et al., 2005; Tay, 2000). A instalação de semáforos tem apresentado resultados promissores na redução da gravidade dos sinistros, embora possa aumentar a frequência de sinistros com danos materiais (Ahmed, 2015; Claros, 2017; Reyad et al., 2017). Após a instalação do semáforo, eventos de avanços do estágio de vermelho, excesso de velocidade, além das trocas sistemáticas de preferência da corrente veicular, representam as situações de maior risco de sinistros (Elvik, 2011; Penã, 2011).

Do ponto de vista da segurança viária, é possível perceber que os semáforos reduzem a severidade dos sinistros, porém, aumentam as ocorrências com danos materiais, principalmente colisões traseiras. Portanto, é essencial a existência de outras intervenções,

como a sinalização das vias e a fiscalização, seja por um agente de trânsito ou por meio eletrônico (Vanlaar et al., 2014).

Para Vanlaar et al. (2014), a fiscalização eletrônica é uma prática que contribui com a segurança viária, através de meios eletrônicos que têm como objetivo observar o cumprimento das normas sobre velocidade de veículos e avanços semafóricos. Esse tipo de fiscalização é um recurso amplamente utilizado para o controle das leis de trânsito estabelecidas e pode ser eficaz na redução da severidade dos sinistros (Dos Santos, 2019).

Como estratégia para investigar de forma mais precisa o efeito da instalação dos dispositivos de fiscalização eletrônica de avanço semafórico e excesso de velocidade (DFE), diversas pesquisas utilizam a aplicação de estudos observacionais do tipo "antes e depois".

De acordo com Pauw et al., (2014), os quais realizaram um estudo antes e depois com o Grupo de Comparação, a instalação de DFE em Flandres, na Bélgica, reduz em 14% o registro de ocorrências com vítimas gravemente feridas.

Christie et al. (2003) e Gains et al. (2004), utilizaram um grupo de comparação com o objetivo principal de identificar locais que não passaram pela instalação de DFE, mas que possuíam características semelhantes aos locais que receberam o tratamento. Chen et al. (2000), Goldenbeld et al. (2005) e Keall et al. (2001) conduziram estudos de avaliação da aplicação de aparelhos de fiscalização eletrônica em estradas da Holanda, Canadá e Nova Zelândia. No entanto, esses estudos foram realizados em um curto espaço de tempo em relação à implantação da fiscalização.

No Brasil, a avaliação do impacto da fiscalização eletrônica na segurança viária ainda está sendo explorada de forma introdutória. Dos Santos (2019) analisou o impacto dos controladores eletrônicos de velocidade na redução do número e da gravidade de sinistros de trânsito com vítimas, focando especificamente nos trechos federais. A metodologia adotada para avaliar esses incidentes foi a Metodologia DNER (1998), que sugere a seleção de um ponto de comparação para cada ponto tratado, similar em termos geométricos e operacionais. Além disso, foi utilizada a Metodologia Vadeby & Forsman (2018), que emprega um estudo antes e depois com um grupo de controle, juntamente com o Teste *t de Student*, comumente usado para avaliar diferenças entre médias de dois grupos, como no caso de estudos para analisar o impacto de intervenções.

Nos estudos do tipo antes e depois mais tradicionais como o *Naïve* (EAD/*Naïve*) e o com Grupo de Comparação (EAD/GC) são comuns agregações temporais em torno de três anos no período antes, além da estimativa do número previsto de sinistros no período depois caso a implantação da fiscalização não ocorresse ( $\pi$ ) sem considerar de forma explícita, a

tendência do retorno à média de sinistros no período depois (fenômeno de regressão à média), tendo como exemplo os estudos de Hoye (2014) e Elvik (2017). Tais desafios metodológicos acabam por limitar consideravelmente o grau de certeza e precisão dos resultados, muitas vezes superestimando o efeito da medida (Hauer, 1997).

Os estudos observacionais do tipo antes e depois com o Método Empírico de Bayes (EAD/MEB), de acordo com Hauer et al. (2002), são capazes de considerar adequadamente o efeito da regressão à média. Além disso, esse método permite a utilização de um período de análise mais amplo e considera de forma objetiva fatores que podem ser controlados e medidos, como o fluxo veicular (Hauer et al., 2002).

Dessa forma, um estudo que utilize o EAD/MEB para avaliar o impacto da fiscalização eletrônica na segurança viária em vias urbanas ajudaria pesquisadores e profissionais a refletirem se as instalações da fiscalização têm algum impacto na melhoria do desempenho da segurança viária.

Apesar de sua maior precisão e confiabilidade, aplicação do EAD/MEB pressupõe a disponibilidade de ao menos uma Função de Desempenho de Segurança Viária (FDSV), as quais, por sua vez, demandam a existência de uma série histórica completa do Volume Diário Médio Anual (VDMA) para os anos em análise. Esses dados são fundamentais para realizar uma análise precisa do impacto da fiscalização eletrônica na segurança viária. A falta dessas informações pode limitar a capacidade de avaliação e compreensão do efeito da fiscalização eletrônica ao longo do tempo (Cunto et al., 2014).

No Brasil, o EAD/MEB ainda é explorado de forma muito incipiente devido às limitações nas informações de VDMA e, consequentemente, às elaborações de FDSV, limitando assim a validade da maioria dos estudos observacionais do tipo antes e depois na segurança viária. Nesse contexto, o problema de pesquisa motivador deste trabalho está relacionado à necessidade de consolidar a compreensão do efeito da fiscalização eletrônica e avanço semafórico na frequência de sinistros de trânsito em interseções semaforizadas superando limitações metodológicas relacionadas ao tempo de observação e ao fenômeno de regressão à média.

A partir da contextualização apresentada, torna-se possível o estabelecimento das seguintes questões de pesquisa:

- a) Como pode ser obtido o VDMA para interseções semaforizadas em uma análise de série histórica, e quais metodologias e fontes de dados são mais eficazes para garantir a precisão e a relevância das informações ao longo do tempo?

- b) Quais FDSV anuais são as mais adequadas para representar a frequência de sinistros em interseções semaforizadas no âmbito de Fortaleza, considerando potenciais transferências temporais e dentro de um horizonte de estudo que inclua os anos de 2010 a 2019?
- c) Quais são os fatores modificadores de sinistros e suas respectivas precisões obtidos a partir do EAD/MEB para sinistros com vítimas feridas e fatais em interseções semaforizadas com fiscalização eletrônica de avanço semafórico e velocidade?
- d) Quais as principais diferenças nos resultados obtidos para o estudo com EAD/MEB, em comparação com o método simples e o método com grupo de comparação?

## **1.2 Objetivos**

Essa pesquisa tem como objetivo geral avaliar o impacto da fiscalização eletrônica de avanço semafórico e de velocidade na frequência e severidade de sinistros em interseções semaforizadas de Fortaleza/CE, observando o efeito de regressão à média e as variações de volumes de tráfego nos anos de 2010 a 2019. Para que esse objetivo seja alcançado, propõe-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Estimar o VDMA de interseções semaforizadas a partir de volumes de tráfego fornecidos através da fiscalização eletrônica, laços detectores e pesquisas manuais de curta duração realizadas em entidades similares, considerando ainda a dependência espacial e atributos geométricos dos locais;
- b) Transferir temporalmente as FDSV de interseções semaforizadas para o horizonte dos anos de 2010 a 2019, tomando como base a FDSV de Fortaleza desenvolvida para o ano de 2011.
- c) Avaliar, comparativamente, os resultados obtidos através do EAD/MEB com outras metodologias de estudos observacionais, bem como trabalhos que se diferem das condições físicas e operacionais da cidade de Fortaleza.

## **1.3 Estrutura da pesquisa**

A presente pesquisa de mestrado está subdividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo consiste na apresentação introdutória, que aborda os problemas de pesquisa e seus respectivos objetivos. No Capítulo 2, é realizada uma revisão sobre o uso da fiscalização eletrônica em âmbito mundial. Em seguida, são abordados os conceitos do EAD/MEB, relacionados ao seu uso na avaliação de sinistros de trânsito, bem como a utilização das

funções de desempenho da segurança viária. Além disso, são discutidos estudos que empregaram técnicas de imputação de volumes de tráfego. No Capítulo 3, são descritas as etapas do processo metodológico utilizadas para a realização da avaliação em questão. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia empregada, além da comparação dos resultados com estudos de outros autores. Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões deste trabalho, juntamente com considerações finais relacionadas aos seus objetivos, bem como sugestões para novas pesquisas relacionadas ao tema abordado.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os principais conceitos relacionados aos estudos observacionais "antes e depois" na avaliação da ocorrência de sinistros de trânsito, bem como sua aplicação em estudos envolvendo interseções semaforizadas e aparelhos de fiscalização eletrônica. Além disso, serão abordados os fundamentos do Método Empírico de Bayes, incluindo a apresentação de modelos, variáveis e suas respectivas finalidades no processo de tomada de decisão no planejamento do sistema de transportes.

Após a explanação sobre o EAD/MEB, também serão abordados conceitos e trabalhos científicos relacionados à transferência temporal de FDSV e técnicas de imputação de dados de VDMA.

### 2.1 Estudos Observacionais na Segurança Viária

Os estudos "antes e depois" (ou estudos de série temporal) (EAD) têm sido amplamente empregados na avaliação de intervenções em segurança viária. Esses estudos comparam os indicadores de segurança viária antes e depois da implementação de uma intervenção, como a instalação de dispositivos de segurança ou alterações na infraestrutura viária (Hauer, 2002).

Entre os métodos de previsão dos parâmetros de estudo em segurança viária, destacam-se o EAD/*Naïve*, o EAD/GC e a abordagem do EAD/MEB. Estes métodos geralmente envolvem a estimativa do número esperado de sinistros no período "depois" e a determinação das variâncias associadas, fundamentais para lidar com fenômenos raros e aleatórios como os sinistros de trânsito (Hauer, 2002).

O método proposto por Hauer (2002) é detalhado e estruturado em quatro etapas principais:

- Etapa 01 - Estimar  $\lambda$  e prever  $\pi$ : Neste primeiro passo,  $\lambda$  é estimado com base na contagem de sinistros ocorridos "após" o tratamento. A previsão de  $\pi$  dependerá do método selecionado para determinar qual teria sido o número esperado de sinistros alvo no período "depois", caso o tratamento não tivesse sido realizado.
- Etapa 02 - Estimar  $VAR\{\hat{\lambda}\}$  e  $VAR\{\hat{\pi}\}$ : As estimativas de  $VAR\{\hat{\lambda}\}$  e  $VAR\{\hat{\pi}\}$  variam conforme o método selecionado para estimar  $\lambda$  e  $\pi$ . Para  $VAR\{\hat{\lambda}\}$  assume-se que a

contagem de sinistros segue uma distribuição de Poisson, o que implica que  $VAR\{\hat{\lambda}\} = \lambda$ . Para  $VAR\{\hat{\pi}\}$  utiliza-se repetidamente o método de diferenciais estatísticos para determinar um valor aproximado da variância.

- Etapa 03 - Estimar  $\delta$  e  $\theta$ : A terceira etapa representa na estimação do  $\delta$  e  $\theta$ , onde  $\delta$  é o coeficiente que representa a redução no período "depois" do número esperado de sinistros alvo.  $\theta$  é o coeficiente que representa a razão entre o que a segurança seria com o tratamento e o que teria sido sem o tratamento.

De acordo com Hauer (2002), quando  $\theta < 1$ , o tratamento considerado é eficaz; quando  $\theta > 1$ , a intervenção é prejudicial à segurança. Além disso,  $100 \times (1 - \theta)$  representa a redução percentual na frequência esperada de sinistros.

- Etapa 04 - Estimativa de  $VAR\{\hat{\delta}\}$  e  $VAR\{\hat{\theta}\}$ : A última etapa determina as variâncias associadas  $\delta$  e  $\theta$ . Estes valores são suficientes para formar uma opinião sobre o efeito de segurança de um tratamento para entidade de estudo. As mesmas estimativas também são adequadas para comparar os resultados de vários estudos e para combinar esses resultados quando possível

Após a apresentação das quatro etapas para elaboração de um estudo Antes e Depois na segurança viária, serão apresentados três tipos de métodos para sua aplicação.

### **2.1.1 EAD/*Naïve*.**

Para Hauer (2002), a metodologia "antes e depois" simples consiste em uma comparação entre o número de sinistros de trânsito no período anterior ao tratamento de uma determinada entidade, seja ela um trecho ou uma interseção veicular, e o número de sinistros de trânsito no período posterior ao tratamento. Dessa forma, são considerados diversos efeitos decorrentes tanto do tratamento realizado quanto de outras influências, como as condições dos condutores e das entidades envolvidas. São exemplos dessas influências fatores externos, como volume de tráfego, condições climáticas e comportamento dos usuários da via.

Os fatores mencionados, entre outros, naturalmente sofrem alterações ao longo do tempo, e, dessa forma, a mudança na segurança entre o período antes e o período depois do tratamento reflete a influência desses fatores em conjunto com o efeito do tratamento aplicado. Conforme aponta Hauer (2002), é importante considerar que outras intervenções podem interferir na análise quando se utiliza o estudo "antes e depois" simples. Por exemplo,

podem ocorrer outras intervenções na região estudada, seja no período anterior ou posterior, que podem impactar os efeitos de segurança na entidade avaliada.

É importante destacar também que os estudos "antes e depois simples" apresentam limitações metodológicas significativas, pois não permitem a separação dos efeitos da intervenção dos efeitos de outras variáveis que podem influenciar os indicadores de segurança viária ao longo do tempo.

Apesar dessas limitações, há estudos EAD/*Naïve* disponíveis na literatura que abordam a avaliação da segurança viária. Um exemplo é o estudo realizado por Li et al. (2013), que investigou o impacto dos equipamentos de fiscalização eletrônica de velocidade e avanço no sinistros dos Reino Unido. O estudo analisou a mudança na frequência e gravidade de sinistros de trânsito antes e depois da instalação dos dispositivos. Os autores conduziram uma análise estatística comparando a frequência e gravidade dos sinistros de trânsito antes e depois simples da implantação dos dispositivos de segurança. Observou-se uma redução de 27,5% na frequência dos sinistros após a instalação dos dispositivos. Isso sugere que os dispositivos de segurança, possivelmente, tiveram um impacto positivo na redução de sinistros, tornando a área residencial mais segura para os usuários da via.

Walden et al. (2012), no Texas, utilizaram o EAD/*Naïve* para analisar a eficácia dos DFE em 56 interseções e concluíram que seu uso resultou em uma redução de 30% nos sinistros de todos os tipos e uma redução de 43% nos sinistros com colisões angulares. No entanto, os sinistros com colisões traseiras relacionados ao avanço em sinal vermelho aumentaram em 5%.

Ross e Sperley (2011) realizaram um estudo EAD/*Naïve* dos sinistros envolvendo motoristas em Oregon, Estados Unidos, entre os anos de 2004 a 2007. No período anterior à instalação de DFE, a média de sinistros era de 0,62 por mês. No período após a instalação, a média aumentou em 77,4%, chegando a 1,10 sinistros por mês. Estimativas dos sinistros para diferentes tipos de colisões permitem considerar a expectativa de que as câmeras de fiscalização, provavelmente, resultem em menos colisões angulares, que costumam ser graves, e mais colisões traseiras, nas quais as lesões tendem a ser menos graves. Neste trabalho, não foi considerado o volume veicular no período pré e pós-instalação dos equipamentos, tornando assim impossível avaliar o efeito dessa variável na ocorrência dos sinistros.

De acordo com a literatura abordada, embora os estudos EAD/*Naïve* tenham as suas limitações metodológicas, os mesmos ainda continuam sendo elaborados para avaliar o impacto de intervenções em segurança viária, como análises de dispositivos de segurança, sendo, por exemplo, câmeras de fiscalização eletrônica e/ou sinalização. No entanto, é importante reconhecer que essas abordagens ainda enfrentam limitações, como a falta de controle sobre variáveis e a dificuldade em isolar os efeitos específicos das intervenções, como alteração do VDMA na série histórica em análise.

### **2.1.2 EAD/GC.**

Hauer (2002) aponta que a aplicação de um Grupo de Comparação (GC) objetiva-se, principalmente, a determinação de um conjunto de entidades que não sofreram tratamento e que possuam características semelhantes às entidades que receberam tratamento. Espera-se que a alteração na segurança no período "antes" e "depois" do GC sirva como indicador de como a segurança do grupo de tratamento deveria ter se modificado. Assim, é possível considerar a influência da variação de fatores causais que mudam ao longo do tempo.

A utilização do grupo de comparação baseia-se no princípio de que, na inexistência de um processo de tratamento, a razão esperada do número de sinistros de trânsito "antes" e "depois" seria a mesma para o grupo de tratamento e o grupo de comparação. Desta forma, é possível assumir que os vários fatores que impactam a segurança modificaram-se no período "antes" e "depois" da mesma forma, assim como sua interferência sobre a segurança desses grupos.

É possível perceber que, com a utilização do estudo com EAD/GC, há uma tentativa de estimar, de maneira mais precisa, as implicações da segurança causadas pelo tratamento, diferenciando-se do método simples, no qual não há qualquer distinção entre os efeitos do tratamento e os diversos outros fatores causais que variam ao longo do tempo.

Baseados nesses conceitos, Retting e Kyrychenko (2002) utilizaram-se desse método para avaliar o impacto efeito da instalação de DFE na segurança viária. O estudo foi realizado em Oxnard - Califórnia e avaliou o efeito da instalação de câmeras de fiscalização de avanço de sinal vermelho no número de colisões em cruzamentos controlados por semáforos. O estudo comparou as taxas de colisões em cruzamentos com câmeras antes e após a sua instalação, bem como em cruzamentos sem câmeras. Os resultados indicaram uma redução de 20,1% no número de colisões com ferimentos graves ou fatais nos cruzamentos com câmeras em comparação com os cruzamentos sem câmeras.

Vanlaar et al. (2014) pesquisaram sobre a eficácia do programa de DFE em Winnipeg, Canadá, no período de 1994 a 2008. Através do EAD/GC, os resultados mostraram que, para sinistros relacionados ao avanço em sinal vermelho, houve uma redução de 46% nas colisões angulares nas interseções com câmeras, mas também houve um aumento inicial de 42% nas colisões traseiras. Para os sinistros relacionados à velocidade, as análises revelaram que a instalação das câmeras não estava associada a aumentos ou diminuições nos sinistros.

Entretanto, esses estudos possuem limitações que devem ser consideradas ao interpretar seus resultados. Entre as limitações mais comuns, podemos citar:

1. Efeito de outras intervenções: os resultados podem ser afetados por outras intervenções que ocorrem simultaneamente à instalação de câmeras. Por exemplo, melhorias na infraestrutura viária ou em programas de educação de trânsito podem ter ocorrido no mesmo período, e essas melhorias podem ter contribuído, de forma diferente para os grupos, para redução de sinistros em cruzamentos.
2. Número total de sinistros: a contagem de sinistros pode ser afetada por problemas na sua contagem, como subnotificação de sinistros ou inconsistências nos relatórios dos agentes de trânsito ou peritos.
3. Viés de seleção de amostra: a seleção de amostra pode ser influenciada por fatores como a localização do aparelho de fiscalização eletrônica ou as características da área, o que pode limitar a generalização dos resultados para outras áreas ou situações.

### **2.1.3 EAD/MEB**

De acordo com Andrew Gelman et al. (2013), o termo "Método Empírico de Bayes" reflete a combinação de princípios bayesianos com uma abordagem empírica para estimar parâmetros. O termo "Bayes" no nome é uma referência ao Teorema de Bayes, que fornece uma estrutura para atualizar probabilidades com base em novas evidências. No entanto, ao invés de usar uma distribuição a priori definida de forma subjetiva, o Método EB utiliza informações dos próprios dados para informar essa distribuição a priori. Esse uso de dados empíricos para estimar a priori é o que confere o caráter "empírico" ao método, destacando a integração entre inferência bayesiana e análise baseada em dados observacionais.

O Método EB vem sendo discutido em estudos de segurança viária durante a última década, especialmente nas avaliações antes e depois. Li et al. (2020) mostram que o

método EB trabalha com a combinação de dados anteriores e observados para obter uma estimativa para o efeito médio do tratamento. Para sua aplicação no conceito de segurança viária, é necessário que as informações prévias sejam obtidas a partir de um grupo de interseções semelhantes, observando a frequência de sinistros para o local tratado.

A utilização do EAD/MEB permite, dentre outros aspectos, ampliar a série histórica de sinistros analisados, considerar formalmente variáveis medidas e com sua influência no DSV incorporada (modelagem), além de levar em consideração possíveis vieses de seleção (fenômeno de regressão à média) (Hauer, 2002; Persaud, 2005; Elvik, 2008). O EAD/MEB é aplicado com o auxílio de uma FDSV, utilizada para modelar a relação entre a frequência de sinistros das entidades selecionadas e variáveis dependentes, como o fluxo veicular, extensão do segmento, número de faixas, dentre outras (Hauer et al., 2002). Por meio da combinação do número de sinistros estimados pelo modelo escolhido com o número de sinistros registrados nos locais tratados, é possível obter uma melhor estimativa da frequência de sinistros no período depois, caso a implantação não tivesse ocorrido.

A maioria dos estudos com a aplicação do MEB em foco no DSV dos DFE disponíveis, foram realizados em jurisdições de países desenvolvidos utilizando amostras de 24 a 253 interseções semaforizadas, com um período de estudo total em média de, aproximadamente, três anos. A Tabela 1 traz um resumo destes principais estudos.

Tabela 1: estudos com EAD/MEB na literatura

<b>Autor</b>	<b>Local</b>	<b>Sinistro-alvo</b>	<b>#Interseções</b>	<b>θ</b>	<b>IC 95%</b>	<b>Redução</b>
Mahmassani (2017)	Chicago	Vítimas feridas ou fatais	85	0,84	0,81;0,87	16%
Claros et al. (2016)	Missouri	Vítimas feridas ou fatais	24	0,93	0,90;0,96	7%
Contini e El-Basyouny (2016)	Edmonton	Total de colisões	50	0,82	0,75;0,88	18%
Llau et al (2015)	Flórida	Vítimas feridas ou fatais	20	0,81	0,62;0,99	19,1%
de Pauw et. al. (2014)	Flanders	Vítimas feridas ou fatais	253	0,86	0,73;1,02	14%
Lord et al. (2014)	Chicago	Vítimas feridas ou fatais	90	1,05	1,01;1,09	-

Fonte: elaborado pelo autor.

É possível destacar que os estudos mencionados anteriormente utilizaram EAD/MEB para controlar outros fatores que poderiam influenciar a segurança do trânsito, como o VDMA e as características geométricas da interseção, por exemplo. Essas pesquisas forneceram evidências de que os equipamentos de fiscalização eletrônica, com ênfase no avanço semafórico, podem ser eficazes na redução de colisões e lesões graves. No entanto, é importante ressaltar a ausência de estudos semelhantes no Brasil, tornando-se essencial realizar pesquisas que considerem as condições metodológicas e abordagens específicas do país, tendo como exemplo o tipo de sinistros e a geometria abordada.

Para preencher essa lacuna, é fundamental utilizar metodologias que permitam uma avaliação precisa e contextualizada das medidas de segurança viária. Uma abordagem relevante é a análise e a aplicação de FDSV. Dessa forma, a próxima seção irá explorar como a Transferência Temporal e a Calibração de funções podem ser aplicadas para avaliar a eficácia das intervenções de segurança viária em diferentes contextos.

## **2.2 Transferência Temporal e Calibração de Funções de Desempenho da Segurança Viária**

As Funções de Desempenho da Segurança Viária (FDSV) são expressões que correlacionam a ocorrência de sinistros de trânsito com características geométricas e operacionais da via, tratando a aleatoriedade desse fenômeno. De acordo com Cunto et al., (2014), o desenvolvimento desses modelos é importante para o diagnóstico das condições de segurança de diferentes atributos do ambiente viário. Para a elaboração desses modelos, é necessária uma extensa série histórica de dados que correspondam à frequência de sinistros e aos atributos geométricos e operacionais das localidades onde ocorreram esses eventos. No entanto, em algumas situações, a obtenção dessas informações é interrompida devido à falta de continuidade no período de coleta dos dados e à confiabilidade dos registros.

Além do desenvolvimento das FDSV, é possível calibrar modelos já desenvolvidos para outros anos. Essa calibração das funções apresenta menos dificuldades quando os dados disponíveis são escassos, tornando-se uma opção viável quando eles não possuem a qualidade esperada. De acordo com o Highway Safety Manual - HSM (AASHTO, 2010), é fornecida uma metodologia de calibração e disponibilizados modelos como base, no entanto, eles foram desenvolvidos no contexto americano. No entanto, esses modelos reproduzem as características específicas de suas regiões, havendo, portanto, incertezas sobre a aplicação desses modelos em outros locais.

Para Sacchi et al. (2012), embora o HSM possa ser um recurso valioso na calibração, os diferentes sistemas rodoviários, as condições geográficas de cada região, a formação e o comportamento dos condutores, bem como a frequência dos sinistros e os padrões de gravidade podem resultar em previsões de sinistros diferentes da base do HSM, que foi desenvolvida com base em dados dos Estados Unidos. Dessa forma, os algoritmos apresentados no HSM devem ser calibrados e validados, e sempre que possível, novos algoritmos devem ser desenvolvidos com base estatística em ambientes que sejam substancialmente diferentes da região norte-americana.

De acordo com o método de previsão de sinistros do HSM, três elementos fundamentais podem ser destacados: a FDSV para condições primárias, os Fatores de Modificação de Sinistros (CMF) e um fator usado para calibração ( $Cx$ ), permitindo assim ajustar o FDSV às condições locais. A equação pode ser representada por (AASHTO, 2010):

$$N_{previsto,i} = N_{FDSV,i} \times (CMF_{1,i} \times CMF_{2,i} \times \dots \times CMF_{y,i}) \times Cx \quad (1)$$

Onde:  $N_{previsto,i}$ : número de sinistros previstos para um ano específico em um local  $i$ ;

$N_{FDSV,i}$ : número de sinistros previstos determinado para a condição básica da FDSV desenvolvida para o local  $i$ ;

$CMF_{y,i}$ : fator de modificação de sinistros do FDSV para o local  $i$ ;

$Cx$ : fator de calibração para ajustar o FDSV para as condições locais.

As FDSV básicas no HSM geralmente são calibradas, tendo como premissa a distribuição binomial negativa para o número de sinistros observados, que é considerada mais apropriada para modelar a alta variabilidade natural dos dados de sinistros de trânsito. Em seguida, os CMF são utilizados para ajustar a frequência de sinistros previstos a partir do FDSV base, levando em consideração os atributos característicos de cada entidade, como o número de faixas de conversão, iluminação, entre outros. No processo de calibração recomendado no HSM (AASHTO, 2010), o fator de calibração ( $Cx(i)$ ) é obtido por:

$$Cx(i) = \frac{\sum_{todos\ os\ locais\ (i)} sinistros\ observados}{\sum_{todos\ os\ locais\ (i)} sinistros\ modelados} \quad (2)$$

Os valores da modelagem ( $N_{previsto,i}$ ) podem então ser aplicados para melhora da previsão do número esperado de sinistros na entidade por meio do método empírico de Bayes

(EB). O método EB é visto como determinante para compensar o efeito regressão à média, normalmente presente nas pesquisas de segurança viária, através da escolha incorreta de pontos críticos e a superestimação do efeito de intervenções no desempenho da segurança viária (Hauer, 1997; HSM, 2010).

### **2.3 Estimativa de Fluxo Médio Diário Veicular**

Na etapa de planejamento, é necessário ter conhecimento do volume veicular para tomar decisões relacionadas ao controle de semáforos, implantação de dispositivos de fiscalização eletrônica, análise de sinistros de trânsito e avaliação de melhorias no sistema viário como um todo, visando à segurança dos usuários. Por exemplo, diversos estudos foram realizados para investigar o efeito do fluxo veicular na frequência de ocorrência de sinistros (Zhou e Sisiopiku, 1997; Hughes e Council, 1999; Sobreira, 2019). Os principais resultados mostram diferentes correlações entre os sinistros observados e o volume veicular. Hughes e Council (1999) estudaram a hipótese de que não é o fluxo de tráfego em si que aumenta a probabilidade de sinistros, mas sim as oscilações no volume, que tendem a aumentar o congestionamento e, consequentemente, a ocorrência de sinistros.

Sobreira (2019) avaliou o regime de fluxo veicular com agregação sub-horária e a frequência e severidade dos sinistros de trânsito em interseções semafORIZADAS de Fortaleza/CE. Segundo o autor, os principais resultados da análise exploratória e da modelagem da relação foram: (i) a ocorrência de sinistros com apenas danos materiais é mais provável em regimes com altas demandas veiculares; (ii) a frequência de sinistros com vítimas em regimes de alta e baixa demanda veicular é similar, indicando que uma parte dos sinistros ocorre devido ao desenvolvimento de velocidade e outra devido à exposição e vulnerabilidade dos usuários; (iii) os regimes que combinam baixa demanda veicular com ciclos semafóricos longos e alta demanda veicular com ciclos semafóricos curtos são os mais críticos, principalmente em termos de sinistros com vítimas.

Com o objetivo de fornecer maior esclarecimento sobre o uso do fluxo veicular como suporte na tomada de decisão em nível estratégico e auxiliar em novos trabalhos científicos, serão apresentadas pesquisas que abordam o método de coleta e classificação de dados e formas de representar o volume de tráfego.

A estimativa do VDMA a partir de contagens de curta e média duração tem sido amplamente estudada na literatura. Essa prática se dá devido ao fato de que os equipamentos de contagem contínua podem ser afetados por agentes externos, interrompendo seu

funcionamento. Assim, várias pesquisas trabalham com diferentes técnicas, permitindo obter estimativas mais precisas (RAMSEY, 1996; WRIGHT et al., 1997; FHWA, 2001). De acordo com Erhunmwunsee (1991) e Davis (1997), o VDMA geralmente é obtido por meio de estimativas baseadas em fluxos de períodos inferiores a um ano, utilizando fatores de expansão a partir de uma base histórica de dados de volumes horários. Esse método é utilizado devido à possibilidade de interrupção do funcionamento dos equipamentos de contagem contínua por agentes externos.

### **2.3.1 Imputação de Dados**

A imputação de dados refere-se ao método de preenchimento de dados perdidos ou corrompidos com estimativas (Zhang e Liu, 2008). Alisson (2001) mostra que as metodologias iniciais de imputação envolvem o uso das médias dos dados históricos de laços detectores ou aparelhos de fiscalização eletrônica próximos ao local de estudo para prever os dados faltantes. Por exemplo, um modelo histórico pode preencher os dados perdidos com a média histórica daquele laço detector de veículos, considerando o mesmo local, horário e dia da semana. Além disso, também é possível utilizar os dados dos laços detectores próximos, realizando a técnica de imputação com a média ou a média ponderada das informações coletadas próximas ao local que não possui dados suficientes (Al-Deek et al., 2004).

Para Su et al. (2007), no caso de dados de volumes veiculares, as previsões de curto prazo são mais influenciadas por fatores estocásticos do que pelas previsões de longo prazo, apresentando comportamentos menos compreendidos e maiores incertezas. Portanto, a utilização de modelos matemáticos clássicos, como o Filtro de Kalman, Modelos de Séries Temporais ARIMA e Método de Distribuição de Vias (modelos matemáticos de interpolação considerando dados espaciais e históricos), não é capaz de atender satisfatoriamente aos dados de tempo real de um controle de tráfego específico (Smith e Conklin, 2002).

Para lidar com o problema de perda de dados veiculares, os pesquisadores têm se voltado para métodos estatísticos, como regressão e múltipla imputação, que são mais eficientes e precisos em comparação com os métodos padrão de imputação de dados (Al-Deek et al., 2004; Chen et al., 2003; Smitt e Babiceanu, 2004; Zhong, 2004). Farhan e Fwa (2013) aplicaram a Múltipla Imputação (MI) de Monte Carlo por cadeias de Markov, na qual a ideia inicial foi tratar os dados ausentes como indicadores de interesse e determiná-los coletando uma série amostral para esses mesmos indicadores, resultando na combinação de múltiplas respostas (característica da técnica de Múltipla Imputação). Por sua vez, Schafer (1997) e

Dempster et al. (1977) utilizaram a técnica de Maximização de Expectativa (ME) combinada com Data Argumentation (DA) (variação especial da Múltipla Imputação de Monte Carlo), também abordada pelo próprio Shafer (1997). Nessa metodologia, o algoritmo de Maximização de Expectativa realiza iterações e, por meio da taxa de erros, define o desempenho de convergência.

Para diversificar o processo de imputação de dados veiculares, vários autores têm trabalhado com Machine Learning. Para Li et al. (2013), esse método estatístico utiliza dados históricos para aprender sobre o processo e imputar os dados perdidos de forma iterativa. Lv (2015) cita as Redes Neurais para previsão de dados de fluxo de tráfego, considerando correlações espaciais e temporais de forma intrínseca.

Entretanto, o VDMA usualmente apresenta dependência espacial, ou seja, pontos próximos entre si no espaço possuem características de tráfego mais parecidas do que pontos distantes (Tobler, 1970). No contexto urbano, tal fenômeno se dá em função da estrutura espacial da cidade, que concentra os principais destinos em regiões específicas, como o centro comercial, por exemplo. Dessa forma, o volume de tráfego tende a ser maior nas centralidades da cidade e diminui gradualmente ao se distanciar delas. Porém, diversos métodos para a imputação de dados de tráfego, como aqueles baseados na média, modelos estatísticos (regressão linear e de Poisson) e de aprendizagem de máquina tradicionais, usualmente não contabilizam a dependência espacial do VDMA no processo de modelagem e estimativa em um ponto não amostrado (Hilbe, 2014; Song e Kim, 2022; Yan e Su, 2009). Essa limitação pode ser superada pela adoção de abordagens espaciais, conforme detalhado na subseção a seguir.

### **2.3.2 Krigagem e a Imputação de Volumes Veiculares**

De acordo Bailey e Gatrell (1995), uma alternativa para lidar com dados faltantes ou ausentes é a técnica de Krigagem. Esta técnica geoestatística utiliza um método de interpolação baseado em regressão, aproveitando um conjunto de dados observados e ponderando-os com base nas covariâncias espaciais. Isso permite calcular pesos que resultam em estimativas mais precisas. A Krigagem é amplamente empregada em vários setores da engenharia e planejamento de transporte para resolver problemas relacionados à falta de dados. Marques e Pitombo (2020) fornecem uma visão geral de como a Krigagem é usada na modelagem da demanda de transporte, abrangendo áreas como zonas de tráfego, trechos viários, residências, e pontos de parada e estações de transporte público.

A Krigagem Universal também é uma técnica amplamente aplicada na análise de tráfego para estimar dados de contagem de veículos em pontos específicos ao longo de toda a rede viária. Esse método leva em consideração a estrutura espacial dos dados de tráfego, utilizando a dependência espacial entre os pontos de contagem para prever com precisão os volumes de tráfego em locais onde não há amostras diretas (Nunes et al, 2023).

Na Krigagem, a dependência espacial da variável de interesse é modelada a partir da função semivariograma (Equação 3) (Cressie, 1993; Matheron, 1971).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [Y(x_i + h) - Y(x_i)]^2 \quad (3)$$

No qual  $Y(x_i)$  denota o valor da variável de interesse no ponto  $x_i$ ;  $h$  representa a distância entre pares de pontos no conjunto de dados; e  $N$  é o número de pares distantes um do outro por  $h$ . Conforme a distância  $h$  é alterada, o semivariograma apresenta um perfil ascendente a partir da origem, uma vez que pontos espacialmente dependentes são parecidos a pequenas distâncias, mas começam a exibir uma maior variância à medida em que a separação entre eles aumenta.

Na Krigagem Universal, o semivariograma é utilizado para analisar os resíduos de uma função linear. Neste método, considera-se que a variação da variável de interesse é influenciada por uma tendência de grande escala, que é descrita por uma combinação linear de variáveis preditoras, além de um padrão de pequena escala devido à estrutura espacial dos dados. As previsões obtidas por meio da Krigagem Universal são calculadas conforme a Equação 4 (Cressie, 1993).

$$Z^*(x_o) = [x_o][\beta] + [V_{s0}^T][V_s^{-1}][\varepsilon] \quad (4)$$

Onde  $X_o$  refere-se aos preditores,  $\beta$  são os coeficientes calibrados,  $V_{so}$  é a matriz de covariância entre o ponto a ser estimado e seus vizinhos;  $V_s$  é a matriz de covariância entre os pontos vizinhos; e  $\varepsilon$  são os resíduos da equação de tendência.

A relação entre a função de covariância e o semivariograma é estabelecida através da Equação 5, conforme descrito por Cressie (1993).

$$V(h) = c_0 + c_1 - \gamma(h) \quad (5)$$

No contexto,  $c_0$  e  $c_1$  representam medidas de variância: o efeito pepita e o patamar parcial, respectivamente. O efeito pepita indica o nível de variabilidade espacial entre pontos muito próximos, enquanto o patamar parcial quantifica a variância resultante da estrutura espacial dos dados. Um terceiro parâmetro relevante é o alcance ( $a$ ), que define a distância na qual os pontos ainda apresentam autocorrelação espacial (Matheron, 1971). Esses parâmetros são ajustados com base em um modelo predefinido. Neste estudo de caso, utilizou-se o modelo exponencial (Olea, 2006), conforme Equação 6, que tem mostrado ser o mais eficaz na modelagem do VDMA em comparação com outras abordagens (Marques et al., 2023).

$$\gamma(h) = c_0 + c_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right] \quad (6)$$

Segundo a literatura, Eom et al. (2006) aplicaram o método de Krigagem Universal para prever o VDMA em vias não-expressas nos Estados Unidos. Na pesquisa, eles avaliaram três tipos de semivariogramas – gaussiano, exponencial e esférico – e utilizaram quatro métodos de estimação: mínimos quadrados, mínimos quadrados ponderados, máxima verossimilhança e máxima verossimilhança restrita. Os resultados mostraram que essa abordagem oferece uma estimativa mais precisa dos volumes de tráfego em áreas urbanas.

Selby e Kockelman (2013) compararam o desempenho da Regressão Geograficamente Ponderada (RGP), em suas versões biquadrática e gaussiana, com o da Krigagem Universal na previsão do VDMA, usando contagens de tráfego do estado do Texas de 2005. Para a modelagem dos dados, os pesquisadores consideraram tanto a distância euclidiana quanto a distância de rede entre os pontos de contagem. O estudo abrangeu aproximadamente 8.900 contagens em vias urbanas e rurais, incluindo uma variedade de características funcionais como limite de velocidade, número de faixas, classe funcional da via, densidade populacional e de empregos, além de índices de acessibilidade com base no censo americano. Os resultados indicaram que a Krigagem Universal superou a RGP em desempenho, e que os resultados obtidos com a distância euclidiana foram comparáveis aos resultados obtidos com a distância de rede.

Diversos estudos confirmaram que a Krigagem é mais eficaz na modelagem do VDMA do que abordagens não espaciais (Eom et al., 2006; Kim et al., 2016; Mathew e Pulugurtha, 2021; Sarlas e Axhausen, 2015; Selby e Kockelman, 2013; Song et al., 2019; Yang et al., 2018). Além disso, a Krigagem mostrou-se superior a outros modelos espaciais

(Marques e Pitombo, 2023; Sarlas e Axhausen, 2015; Selby e Kockelman, 2013) e demonstrou um bom desempenho preditivo mesmo em cenários com poucos preditores (Marques e Pitombo, 2023; 2021).

No entanto, os estudos que aplicam a Krigagem para resolver problemas relacionados à falta de dados de tráfego geralmente se concentram em segmentos viários. Para interseções viárias, o VDMA dos segmentos que compõem o cruzamento é agregado para representar o VDMA da interseção. Uma alternativa seria usar o VDMA desagregado por segmento e depois somar as estimativas para cada aproximação. Contudo, essa abordagem exigiria separar os segmentos por direção (montante e jusante), o que pode ser uma tarefa complexa e onerosa, especialmente em redes urbanas altamente ramificadas.

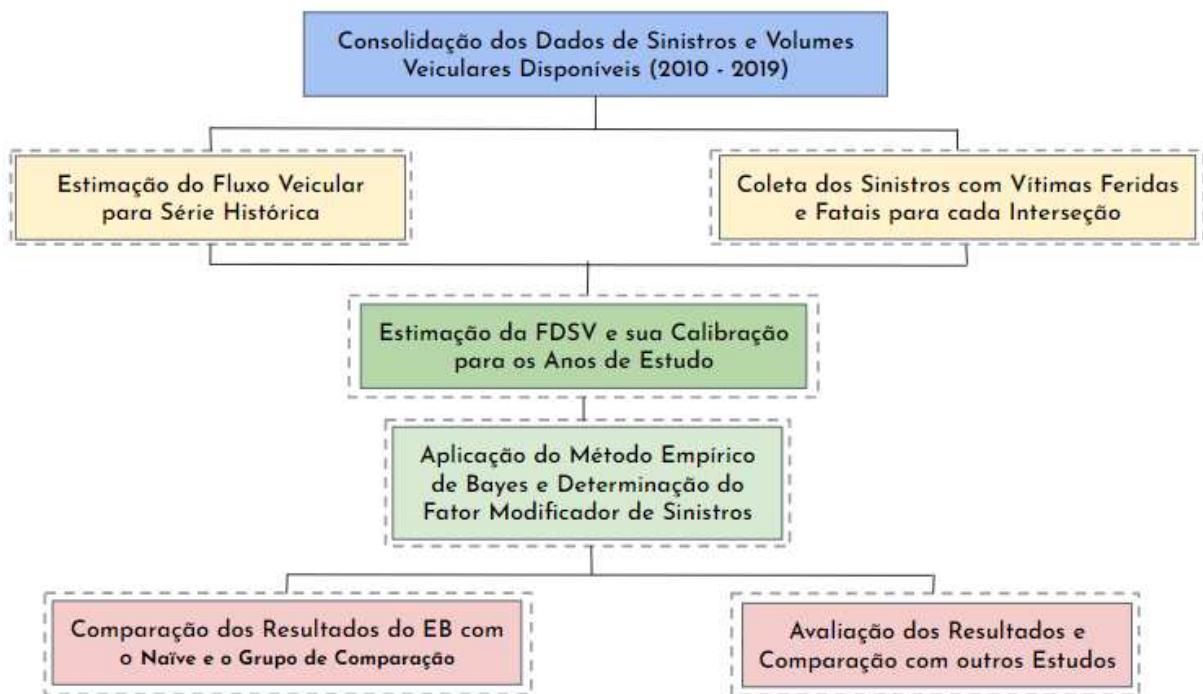
Dessa forma, a modelagem espacial do VDMA no âmbito de interseções aparece como uma alternativa promissora para a estimativa do volume de tráfego em pontos não amostrados, dada a importância desses dados para a realização de diversos estudos. Porém, conforme sintetizado pela revisão de literatura, a aplicação de métodos que contabilizem a dependência espacial do VDMA por interseção ainda é pouco explorada.

Nunes et al. (2023) propuseram um método baseado na Krigagem Universal para a estimação do VDMA em interseções da cidade de Fortaleza. Por meio da utilização de dados de contagem de tráfego, no ano de 2011, e informações geoespaciais, desenvolveram um modelo capaz de fornecer estimativas confiáveis do VDMA em interseções não amostradas.

### 3. MÉTODO

A abordagem metodológica utilizada para alcançar o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho foi realizada a partir das seguintes etapas apresentadas no fluxograma da Figura 1. As próximas seções deste capítulo apresentam o detalhamento de cada uma destas etapas.

Figura 1: Fluxograma das etapas do método



Fonte: elaborado pelo autor

#### 3.1 Consolidação dos Dados de Sinistros e Volumes Veiculares

Os estudos de segurança viária abrangem diversos aspectos e requerem uma abordagem cuidadosa. Para realizar a análise, é necessário planejar uma série de medidas, como a seleção dos locais, duração da observação e coleta de dados. O estudo observacional do tipo antes e depois é uma ferramenta importante para avaliar intervenções e mudanças ao longo do tempo. No entanto, é inegável que esse tipo de pesquisa pode ser desafiador de planejar e conduzir devido a diversos motivos importantes a serem considerados.

Um dos principais desafios é analisar a quantidade de interseções que foram observadas durante o estudo. Foi necessário verificar se as interseções que passaram por alguma outra intervenção que não seja a implantação de fiscalização eletrônica, ao longo do período de estudo, assim evitando resultados enviesados. Além disso, o período de

implantação da intervenção também é uma questão importante. Quando se realiza um estudo antes e depois, é essencial definir o momento em que a intervenção é implementada.

Uma das vantagens do EAD/MEB é a possibilidade de ampliar temporalmente a amostra de interseções semaforizadas. Desta forma, procurou-se observar as instalações de equipamentos de fiscalização eletrônica referente ao período de 2014 a 2017, sendo possível coletar informações para o estudo antes (2010 - 2013) e depois (2018 a 2019) da instalação dos aparelhos. Durante esse intervalo de tempo, foram registradas informações relevantes sobre a ocorrência de sinistros e seus diversos tipos, tanto antes quanto após a implantação dos dispositivos de fiscalização.

Ao longo do período de estudo que se estendeu de 2010 a 2019 foram identificados diversos desafios que impactaram a coleta e análise das informações referentes aos sinistros e equipamentos observados em diferentes locais. Entre os desafios destaca-se a desinstalação dos equipamentos em alguns locais, o que demandou a coleta detalhada de informações não apenas sobre o mês de implantação, mas também sobre o mês em que ocorreu a retirada dos dispositivos.

O primeiro desafio enfrentado diz respeito à rastreabilidade temporal dos equipamentos. Com a desinstalação ocorrendo em momentos distintos, o processo de coleta de dados tornou-se mais complexo, exigindo a identificação precisa das datas de implantação e desinstalação. Essa necessidade de informações detalhadas adicionais impactou diretamente o planejamento e a organização do estudo, uma vez que a agregação temporal das informações sobre os sinistros ocorria de forma mensal.

Outra dificuldade encontrada foi a possibilidade de viés nos resultados devido à desigualdade na duração do período de exposição ao equipamento. Em locais onde o dispositivo foi retirado precocemente, o período de observação foi reduzido em comparação com locais onde o equipamento permaneceu em funcionamento ao longo de todo o período do estudo, assim justificando o uso do Método EB para corrigir este viés.

Além disso, a falta de uniformidade no tempo de exposição aos equipamentos observados também poderia levar a discrepâncias nos dados coletados, afetando a qualidade das análises e interpretações realizadas.

A coleta de informações detalhadas sobre o período de desinstalação também implicou em maiores exigências junto ao órgão municipal de trânsito, uma vez que foi necessário acompanhar e registrar o status de cada equipamento em diferentes locais ao longo do tempo.

### **3.2 Estimação do Fluxo Veicular para a Série Histórica**

Em relação ao VDMA, não há disponibilidade de valores para todas as interseções da cidade. Esse dado de volume, portanto, é obtido, em alguns casos, por estimativas baseadas em dados de volumes de períodos inferiores a um ano ou a partir da expansão de determinados volumes horários. De acordo com Davis (1997), essas estimativas fazem uso de fatores de expansão gerados a partir de uma base histórica de dados.

O presente trabalho procurou maximizar o espaço amostral do estudo, utilizando diversas bases de dados de fluxo veicular disponíveis em Fortaleza. Contagens veiculares manuais com duração de 8 horas foram expandidas para o dia, mês e ano utilizando os fatores de conversão presentes no estudo de (ASTEF/UFC, 2015). Para algumas interseções semaforizadas a Autarquia Municipal de Trânsito disponibiliza o próprio VDMA. Uma planilha inicial contendo então valores disponíveis de VMDA para os anos de 2010 a 2019 para 36 interseções foi desenvolvida. Deve-se ressaltar que a amostra inicial das interseções semaforizadas não deve conter somente interseções em que houve a intervenção (instalação do equipamento de FE), mas também outras interseções que formarão o grupo para a estimação da FDSV.

Em algumas situações (interseções e anos), não foi possível a obtenção de valores de VDMA estimados ou disponibilizados pela AMC, desta forma, para o presente trabalho, utilizar-se-á a técnica de krigagem universal para estimar o VDMA com base nos dados de volume de tráfego coletados pelo Centro de Tecnologia de Informação e Controle de Tráfego (CTAFOR). A krigagem universal é um método amplamente utilizado na área de análise de tráfego para interpolar dados de contagem de veículos em locais específicos para toda a rede viária de interesse. Essa técnica leva em consideração a estrutura espacial dos dados de tráfego e utiliza a relação entre os pontos de contagem para fazer previsões precisas dos volumes de tráfego em locais não amostrados.

Na Krigagem Universal, é possível calcular um valor estimado da variável de interesse para todos os pontos removendo-se, um a um, os pontos do banco de dados e recalculando seu

valor a partir dos pontos vizinhos e preditores (Cressie, 1993). No presente estudo de caso, duas modelagens foram realizadas: 1<sup>a</sup>) utilizando o banco de dados original completo; e 2<sup>a</sup>) dividindo-se o banco de dados completo em amostra de calibração, com 70% dos pontos originais, e validação, com os 30% remanescentes. A amostra de calibração se refere aos pontos incluídos no processo de obtenção dos parâmetros da equação de tendência e da função de covariância.

Tendo em vista que este trabalho propõe a aplicação de Krigagem para a estimativa rápida, precisa e de baixo custo do volume de tráfego em interseções viárias, apenas dois preditores foram selecionados para compor a modelagem: a soma do número de faixas por interseção e uma variável binária identificando as interseções que possuem semáforo.

. Referente à escolha pelo somatório do número de faixas e da presença de semáforo em cruzamentos ou não, como variáveis de interesse para o estudo, pode-se destacar a disponibilidade das informações pela Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC) e estudos preliminares que mostraram correlação entre as variáveis escolhidas com o VDMA.

O número de faixas tem sido consistentemente utilizado na modelagem do VDMA (Eom et al., 2006; Mathew e Pulugurtha, 2021; Pulugurtha e Kusam, 2012; Selby e Kockelman, 2013). A presença de semáforo, por sua vez, costuma estar associada a maiores volumes de tráfego (Zhu, 2020; Zahedian et al., 2020). A adequação dessas variáveis à predição do VDMA no presente estudo de caso foi confirmada por meio do coeficiente de correlação linear de Pearson.

Para o presente estudo, o coeficiente de correlação linear entre o VDMA e o número de faixas no cenário base foi de 0.745 ( $p < 0.01$ ). No que se refere à presença de semáforo, o coeficiente foi de 0.546 ( $p < 0.01$ ). Uma baixa correlação (0.377) foi detectada entre os dois preditores, reduzindo as chances de multicolinearidade no modelo.

Após calculadas as estimativas de Krigagem Universal para todos os pontos, os valores preditos foram comparados aos reais a partir de duas métricas de erro: Média e Mediana do Erro Absoluto em Porcentagem (*MAPE* e *MedAPE*, *Mean Absolute Percentage Error* and *Median of Absolute Percentage Error*, respectivamente) e Raiz Quadrada do Erro Quadrado Médio (*RMSE*, *Root Mean Squared Error*) (Hollander e Liu, 2008). A seleção de amostras na segunda modelagem foi realizada por meio do método de amostragem aleatória simples. Por fim, a KU foi aplicada para estimar o VDMA em 36 interseções sem esse dado

em Fortaleza. A modelagem por Krigagem Universal foi inteiramente efetuada no software estatístico livre e open-source R ((R Core Team, 2021; Ribeiro Jr. e Diggle, 2016)

Com o método da krigagem universal aplicado aos dados de volume de tráfego do CTAFOR, construiu-se um modelo espacial que nos permitiu estimar o VDMA para locais específicos ao longo da rede viária estudada. Dessa forma, será possível fornecer estimativas confiáveis e detalhadas em locais onde não havia medições diretas.

### **3.3 Coleta e Tratamento dos Dados de Sinistros – Vítimas Feridas e Fatais**

Os dados dos sinistros foram obtidos do Sistema de Informações de Acidentes de Trânsito (SIAT-FOR) da Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC). Esses dados fornecem informações essenciais sobre as características dos sinistros, como data, hora, tipo de colisão e local de registro. No entanto, é importante ressaltar que o tratamento desses dados é necessário devido a algumas limitações, por exemplo, o caso em que alguns sinistros podem ocorrer a montante da interseção, à medida que condutores reduzem a velocidade devido ao semáforo existente. Dessa forma, há a possibilidade de os agentes de trânsito registrarem a ocorrência no meio da quadra e não na própria interseção.

Após a coleta inicial, os dados foram processados para garantir sua consistência e integridade. Esse processo envolveu a limpeza dos registros para eliminar duplicidades e corrigir possíveis erros de entrada, como datas ou horários incorretos. Além disso, foi realizado um cruzamento com registros de outros bancos de dados, como a Plataforma Vida, também da AMC, para validar a localização exata dos sinistros e confirmar se os registros correspondem ao ponto exato da interseção.

Além disso, para garantir a precisão da análise, foram excluídos os sinistros classificados com a gravidade como "não informado". Essa exclusão foi feita para assegurar que apenas eventos com informações claras e verificáveis fossem incluídos na análise, minimizando assim a possibilidade de vieses e assegurando a relevância dos dados para a avaliação da segurança viária.

### **3.4 Estimação das Funções de Desempenho da Segurança Viária para o período 2010 a 2019**

Nesta etapa, adotou-se como ano-base o ano de 2011, que também foi utilizado por Torres (2016) para o desenvolvimento de FDSV para interseções semaforizadas de quatro ramos em Fortaleza. O novo modelo foi desenvolvido a partir de uma amostra de 176 interseções semaforizadas com quatro aproximações na mesma cidade. Para o estudo em questão, serão considerados sinistros com vítimas feridas e fatais como variáveis resposta.

Desta forma, foi realizada a construção dos novas FDSV's para sinistros com vítimas feridas e fatais, com base no ano de 2011, utilizando as variáveis preditoras do estudo de Torres (2016), excluindo da amostra as interseções que já tinham fiscalização semafórica em 2011. O desenvolvimento da FDSV para o ano-base será realizado com modelos lineares generalizados, empregando a distribuição binomial negativa para os erros de estimativa e utilizando os pacotes *caret/imtest* do software *R*. A avaliação dos modelos foi feita por meio de indicadores de ajuste, como o AIC, os logaritmos da verossimilhança, o parâmetro de dispersão e gráficos de resíduos acumulados (cure plots).

A partir da FDSV<sub>11</sub> (ano base) foram estimadas as FDSV's para os anos de 2010 a 2019 de acordo a técnica de Transferência Temporal, a partir do método do HSM (AASHTO, 2010). Essa técnica permitiu ajustar o coeficiente “ $\alpha$ ” da FDSV, assim incorporando alterações que porventura tenham acontecido em outros anos. Supõe-se que as variáveis presentes na fórmula continuam com suas influências ao longo dos anos, mas outros pontos podem ter variado, como por exemplo a fiscalização, chuva e alterações no banco de dados.

### **3.5 Aplicação do Método Empírico de Bayes**

O efeito dos equipamentos de fiscalização eletrônica de velocidade e avanço semafórico nos sinistros foi investigado numa avaliação antes-depois. Para realizar o controle do Fenômeno de Regressão à Média, foi aplicado o método EB, de acordo com Hauer (1997) e Elvik (2008).

Por fim, o efeito dos equipamentos de fiscalização eletrônica de velocidade e avanço semafórico nos sinistros com vítimas feridas e fatais foi investigado com a aplicação do EAD/MEB para as 36 interseções da amostra. O método, de acordo com Hauer (2002) e Elvik (2008), é formado por 4 etapas descritas a seguir:

### *Etapa 01 - Estimativa de $\lambda(j)$ e $\pi(j)$*

O valor de  $\lambda(j)$  representa a segurança de uma entidade tratada  $j$  no período “depois”, refletindo o nível de segurança observado nas entidades após a implementação do tratamento e sendo obtido pelo registro histórico dos sinistros viários (SIAT/FOR).

O valor de  $\pi(j)$ , que estima a segurança da entidade tratada no período “depois”, caso o tratamento não tivesse sido aplicado, representa o nível de segurança que as entidades teriam experimentado no cenário sem tratamento. Para estimar o valor de  $\pi(j)$  faz-se necessário considerar o número esperado de sinistros para a entidade  $j$  no período anterior, o qual é estimado pelo MEB (Equações 7 a 10), corrigido pelos fatores diferentes da implantação que foram modificados ( $r_c$ ), de acordo com a Equação 3.

$$E\{\kappa|K\} = \alpha \cdot E\{\kappa\}_{antes} + (1 - \alpha) \cdot K \quad (7)$$

$$\alpha = [1 + VAR\{K\} / E\{\kappa\}_{antes}]^{-1} \quad (8)$$

$$VAR\{K\} = b(E\{\kappa\}_{antes})^2 \quad (9)$$

$$r_c = E\{\kappa\}_{depois} / E\{\kappa\}_{antes} \quad (10)$$

Onde:

$\alpha$  = peso utilizado no cálculo do número esperado de sinistros;

$E\{\kappa|K\}$  = número esperado de sinistros para o período anterior à intervenção dados os sinistros observados  $K$  no mesmo período;

$E\{\kappa\}_{antes}$  = número esperado de sinistros para o período anterior à intervenção (entidades similares);

$b$  = parâmetro de dispersão da FDSV

$K$  = número observado de sinistros para o período anterior à intervenção;

$E\{\kappa\}_{depois}$  = soma do número previsto de sinistros para o período depois da intervenção.

Com estes parâmetros estimados,  $\pi(j)$  pode ser estimado por:

$$\pi(j) = E\{\kappa/K\} \cdot R_c \quad (11)$$

*Etapa 02 - Estimativa da  $\hat{VAR}\{\lambda(j)\}$  e  $\hat{VAR}\{\pi(j)\}$*

$VAR\{\lambda(j)\}$ : assume-se que o número de sinistros segue uma distribuição de Poisson. Sob essa suposição, a variância de  $\lambda(j)$  é igual ao próprio valor de  $\lambda(j)$ .

A  $VAR\{\pi(j)\}$  é estimada pela equação 12 abaixo:

$$VAR\{\pi(j)\} = R_c^2 \times VAR\{\kappa(j)\} \quad (12)$$

Ressalte-se que com o objetivo de avaliar o efeito global da intervenção (entidades compostas), as demais etapas são aplicadas com a utilização dos somatórios de  $\lambda(j)$ ,  $\pi(j)$ ,  $VAR\{\lambda(j)\}$  e  $VAR\{\pi(j)\}$ .

*Etapa 03 - Estimativa  $\delta$  e  $\theta$*

Na etapa são estimados o valor que representa a redução (ou aumento) na frequência esperada de sinistros alvo por unidade de tempo ( $\delta$ ), além do  $\theta$ , que é a razão entre a segurança com o tratamento e o que teria sido sem o tratamento. Intervenções bem sucedidas apresentam valores de  $\theta$  e seus intervalos de confiança menores que 1. Por outro lado, o valor de  $(1-\theta) \times 100$  pode ser empregado para calcular a porcentagem de redução na frequência esperada de sinistros após a intervenção. As expressões para as estimativas de  $\delta$  e  $\theta$  estão apresentadas a seguir.

$$\delta = \pi - \lambda \quad (13)$$

$$\theta = (\lambda/\pi)/[1 + VAR\{\pi\}/\pi^2] \quad (14)$$

*Etapa 04 - Estimativa de  $\hat{VAR}\{\delta\}$  e  $\hat{VAR}\{\Theta\}$*

Na quarta e última etapa, através da utilização dos valores de  $\lambda(j)$  e  $\pi(j)$  da primeira etapa e  $VAR\{\lambda(j)\}$  e  $VAR\{\pi(j)\}$  da segunda etapa, é possível coletar  $VAR\{\hat{\delta}\}$  e  $VAR\{\hat{\Theta}\}$ , conforme equação 8 e 9.

$$VAR\{\hat{\delta}\} = VAR\{\hat{\pi}\} + VAR\{\hat{\lambda}\} \quad (15)$$

$$VAR\{\hat{\Theta}\} = \Theta^2 [(VAR\{\hat{\lambda}\}/\lambda^2) + (VAR\{\hat{\pi}\}/\pi^2)]/[1 + (VAR\{\hat{\pi}\}/\pi^2)]^2 \quad (16)$$

Para verificar eficácia do método é necessário enfatizar a importância de considerar a variância ao analisar o valor de  $\theta$ , refletindo a precisão da estimativa. Se a variância for alta, a estimativa de  $\theta$  pode ser imprecisa, o que afeta a confiança na eficácia do tratamento. Além disto, deve-se analisar os intervalos de confiança para verificar a faixa em que  $\theta$  pode variar. Desta forma, foram estimados intervalos de confiança de 66% e 95% para o indicador  $\theta$ .

### **3.6 Análise Comparativa**

Após a conclusão das etapas anteriores, os resultados da efetividade da instalação de equipamentos de fiscalização eletrônica foram submetidos a uma análise comparativa com outras abordagens de estudos observacionais, ampliando assim o escopo da pesquisa e proporcionando uma avaliação mais robusta e abrangente dos impactos dessas intervenções na segurança viária.

A comparação dos resultados foi conduzida por meio de três diferentes metodologias observacionais: o EAD/*Naïve*, o EAD/GC e o EAD/MEB. Cada método oferece abordagens distintas para a análise dos dados, sendo fundamental compreender suas particularidades e limitações.

Além disso, a pesquisa incluiu uma comparação com estudos internacionais que investigaram o mesmo tema, embora em contextos geométricos e operacionais distintos da cidade de Fortaleza. Essa comparação proporcionou uma compreensão mais ampla da efetividade dos equipamentos de fiscalização eletrônica, permitindo identificar tendências e padrões consistentes em diferentes cenários.

A análise comparativa foi conduzida com atenção às características físicas e operacionais específicas de Fortaleza, bem como aos resultados de estudos internacionais. Isso garantiu a contextualização adequada dos resultados obtidos, evitando generalizações precipitadas e possibilitando uma interpretação mais precisa dos efeitos da intervenção na segurança viária da cidade.

A comparação dos resultados entre os métodos observacionais contribuiu para identificar discrepâncias ou convergências nos efeitos observados, permitindo uma análise mais detalhada das estimativas de redução de sinistros de trânsito. Ademais, foi possível determinar a consistência e confiabilidade das estimativas, considerando a variação inerente aos dados observados em cada método.

Cabe ressaltar que a avaliação da efetividade dos equipamentos de fiscalização eletrônica enfrenta desafios específicos, tais como a seleção adequada dos grupos de comparação e o controle de fatores de confusão que podem influenciar os resultados. O enfrentamento desses desafios é essencial para garantir a validade dos resultados e permitir uma interpretação adequada dos efeitos observados.

Os resultados obtidos através deste estudo tiveram implicações significativas para a segurança viária e poderão embasar novos estudos e estratégias para a redução de sinistros de trânsito.

#### **4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA EM INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS COM FISCALIZAÇÃO ELETRÔNICA DE VELOCIDADE E AVANÇO SEMAFÓRICO EM FORTALEZA-CE**

Uma vez apresentadas as etapas metodológicas para aplicação do EAD-MEB, apresenta-se neste capítulo uma aplicação para interseções semaforizadas, com presença de equipamentos de fiscalização eletrônica de avanço e velocidade, de Fortaleza.

##### **4.1 Seleção das Interseções**

Considerando o relaxamento temporal proporcionado pelo Método Empírico de Bayes, procurou-se estudar o período abrangido pela primeira década de ação da segurança viária e, também, maximizar o número de locais em que a intervenção foi efetivada. Desta forma, para o EAD/MEB, foram selecionadas as 36 interseções em Fortaleza que receberam equipamentos de fiscalização eletrônica no intervalo de janeiro de 2014 a dezembro de 2017. Essa escolha estratégica permitiu obter um período significativo de implementação, fornecendo dados importantes para avaliar os efeitos das intervenções na segurança viária. O período de análise limita-se até dezembro de 2019. Esta limitação se faz necessária, visto que a partir do ano de 2020, a cidade passou pelas consequências da pandemia de COVID-19, assim tornando o fluxo de veículos totalmente atípico. A Tabela 2 resume as informações das interseções e a Figura 2 mostra um mapa destacando a localização destas.

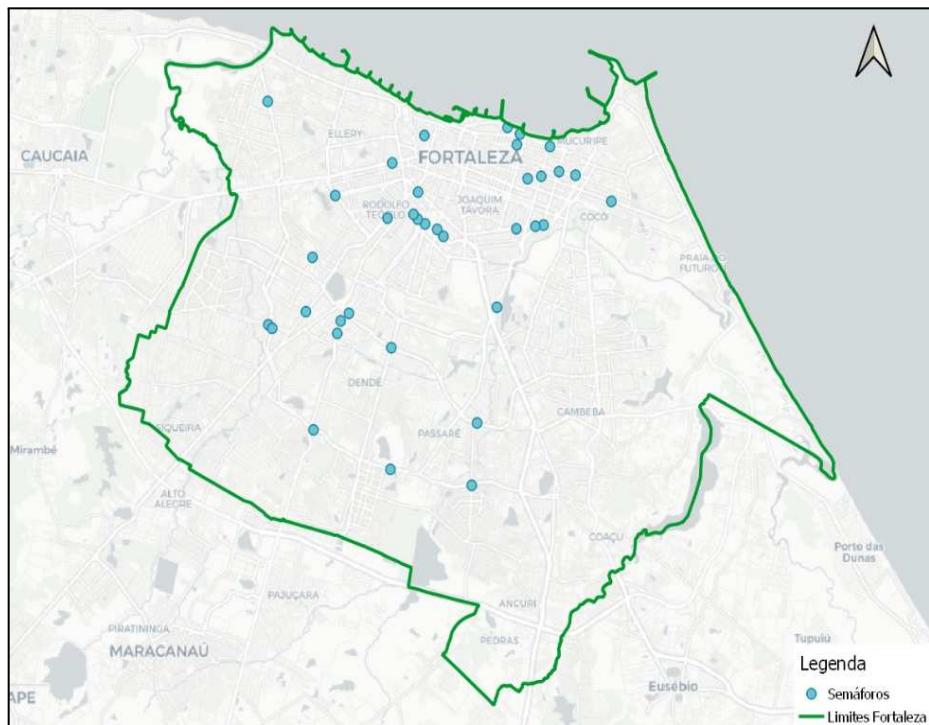
Tabela 2 – Informações das Interseções e Instalação de Fiscalização Eletrônica

ID	Avenida/Rua I	Avenida/Rua II	Data de Implantação Fiscalização Eletrônica
1	Silas Munguba	Bernardo Manoel	11/02/2014
2	Silas Munguba	Germano Franck	11/02/2014
3	Carneiro De Mendonça	Lineu Machado	13/06/2014
4	Thomaz Coelho	Castelo De Castro	30/06/2014
5	Godofredo Maciel	Germano Franck	22/07/2014
6	Moreira Da Rocha	Rui Barbosa	29/07/2014
7	Eduardo Girão	Silva Junior	30/07/2014
8	Júlio Abreu	Oito De Setembro	16/10/2014
9	Santos Dumont	Almeida Prado	28/10/2014
10	Costa E Silva	Cel. Tibúrcio	11/11/2014
11	Augusto Dos Anjos	Júlio Braga	13/11/2014

12	Guilherme Rocha	Padre Mororó	26/11/2014
13	José Bastos	Delmiro De Farias	09/12/2014
14	13 De Maio	Universidade	27/01/2015
15	Pontes Vieira	Vicente Leite	28/01/2015
16	Godofredo Maciel	Ant. Bandeira	04/02/2015
17	Dom Luís	Virgílio Távora	23/09/2014
18	Jovita Feitosa	Humberto Monte	28/05/2015
19	Bezerra De Menezes	José Sombra	03/08/2015
20	Raul Barbosa	Major Araújo Aguiar	13/08/2015
21	Verbena	Vital Brasil	05/11/2015
22	Santos Dumont	Des. Moreira	18/08/2014
23	Eduardo Girão	Júlio César	15/12/2015
24	Eduardo Girão	Damasceno Girão	21/03/2016
25	Raimundo Girão	Rui Barbosa	24/04/2014
26	Cel. Carvalho	Rua Hermes P Parahyba	29/03/2016
27	Eduardo Girão	Dos Expedicionários	03/05/2016
28	Anselmo Nogueira	Rua Emílio Menezes	04/05/2016
29	Raimundo Girão	Ildefonso Albano	03/06/2014
30	Isaac Amaral	Joaquim Nabuco	22/06/2016
31	Eduardo Girão	Luciano Carneiro	22/06/2016
32	Av. Abolição	Des. Moreira	23/07/2014
33	Dep. Paulino Rocha	Pompílio Gomes	08/12/2016
34	Pontes Vieira	Virgílio Távora	13/12/2016
35	Presidente Costa E Silva	Pau Brasil	14/02/2017
36	Torres Câmara	Tibúrcio Cavalcante	22/03/2017

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 2 – Locais das Interseções



Fonte: elaborado pelo autor.

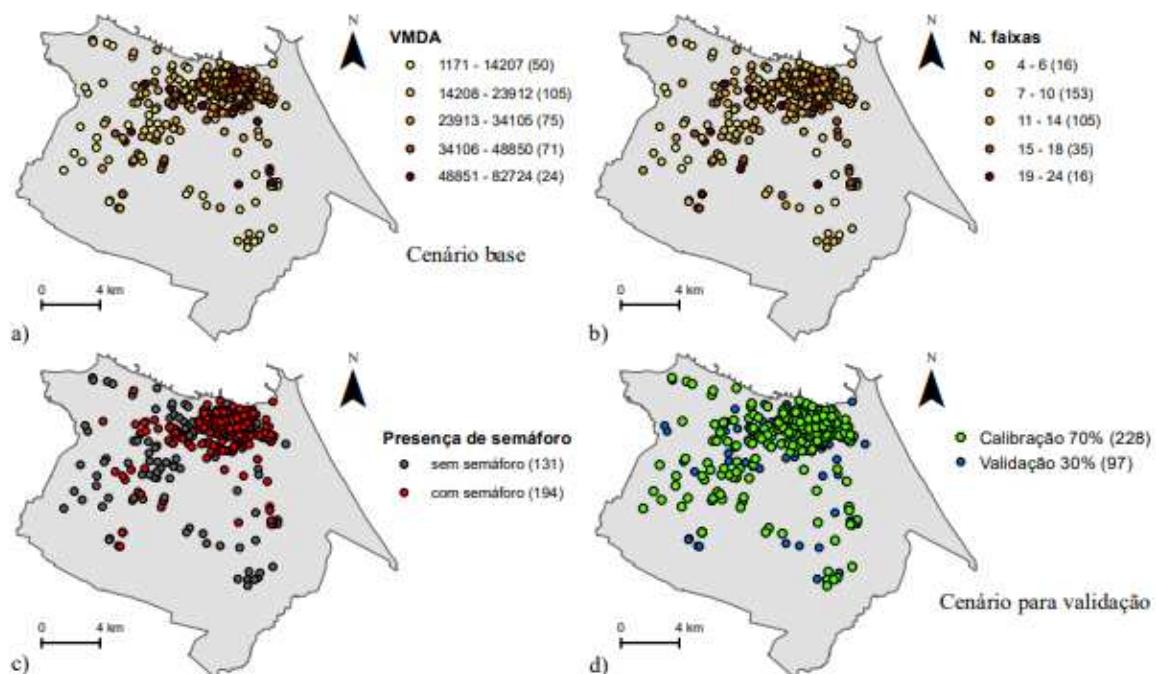
## 4.2 Interpolação de Dados de Volume Veicular – Krigagem Universal

Em Fortaleza, a coleta do VDMA em interseções é realizada pelo Controle de Tráfego em Área de Fortaleza (CTAFOR) por meio de laços de detecção por indução magnética. Inicialmente, foi realizada a seleção das interseções, com seus respectivos VDMAs, que seriam objeto de estudo. Essa seleção baseou-se em interseções que já tinham seus fluxos veiculares disponibilizados. Foi escolhido o ano de 2011 para aplicação da Krigagem Univesal, pois o mesmo estava com o maior número de observações coletadas, totalizando 325 cruzamentos, sendo 194 semaforizados e 131 sem presença de semáforo. Após validação da Krigagem para o ano de 2011, o método foi aplicado para os anos de 2010 a 2019, assim sendo possível estimar as FDSV's para o período em questão.

Durante o processo de tratamento dos dados dos volumes veiculares, foi identificado que algumas interseções não possuíam uma contagem contínua devido a falhas nos laços de contagem veiculares. Essas falhas podem ser atribuídas a diversos fatores, como problemas técnicos nos equipamentos de contagem ou interferências externas que afetam a coleta de dados. Para contornar essa questão, esses cruzamentos foram retirados da contagem, a fim de garantir uma representação mais completa e confiável do volume de tráfego.

A Figura 3 apresenta o banco de dados utilizado no presente trabalho. No cenário base, 325 interseções foram utilizadas na modelagem do VDMA a partir de Krigagem Universal. No cenário alternativo para validação, apenas 228 interseções foram incluídas no processo de calibração do modelo. Nos dois casos, todas as interseções tiveram um valor de VDMA estimado por KU.

Figura 3: (a) VDMA em 325 interseções de Fortaleza; (b) Somatório do número de faixas por interseção; (c) Presença de semáforo nas interseções; (d) Amostras de calibração e validação



Fonte: elaborado pelo autor.

No primeiro cenário, 100% do banco de dados foi utilizado para calibrar os modelos, com validação cruzada realizada para estimar os valores e compará-los com os valores reais. Nesse cenário, como todo o banco de dados foi empregado na calibração, não é possível avaliar como o modelo se comportaria ao estimar um ponto não presente nos dados.

No segundo cenário, 30% do banco de dados foi reservado exclusivamente para validação, permitindo que 70% dos dados fossem utilizados para calibrar os modelos. Com essa abordagem, é possível calcular as estimativas tanto para os 70% utilizados na calibração quanto para os 30% reservados para validação. Assim, o segundo cenário possibilita a análise do desempenho do modelo ao estimar pontos faltantes, ou seja, como o modelo se comporta em relação a dados ausentes no conjunto de treinamento.

Além disso, ao utilizar ambos os cenários, foi possível realizar uma análise de sensibilidade. Essa análise avaliou se a remoção de parte do banco de dados afeta o

desempenho do modelo, oferecendo uma visão mais abrangente sobre a robustez e a capacidade de generalização dos modelos utilizados.

Nota-se uma alta concentração de interseções com VDMA disponível na área norte da cidade, as quais apresentam os maiores volumes de tráfego. Interseções com um expressivo VDMA também podem ser encontradas em outras regiões de Fortaleza, a sudoeste e sudeste do centro. O perfil espacial das duas variáveis explicativas utilizadas (número de faixas e presença de semáforos) também segue o mesmo comportamento do VDMA: interseções com alto volume de tráfego possuem um número maior de faixas e são semaforizadas. A presença de uma estrutura espacial no VDMA confirma a adequabilidade da aplicação de modelos espaciais para a estimativa do volume de tráfego em interseções sem essa informação. A Tabela 3 apresenta os resultados da modelagem do VDMA em interseções de Fortaleza a partir da Krigagem Universal.

Tabela 3: Resultados de Krigagem Universal para a modelagem do VDMA em interseções

<b>Parâmetros</b>	<b>Cenário base</b>	<b>Calibração 70%</b>	<b>Validação 30%</b>
Intercepto	-6.088,32	-6.931,28	
Número de faixas	2.548,63	2.636,24	
Presença de semáforo	7.700,19	8.415,18	
Efeito pepita	53.599.337,00	51.133.644,00	
Patamar parcial	23.599.765,00	31.543.751,00	
Alcance (m)	777,40	500,00	
MedAPE (%)	19,34	19,61	18,56
MAPE (%)	44,07	50,26	30,62
RMSE	8.318,93	8.807,20	7.567,61

Fonte: elaborado pelo autor.

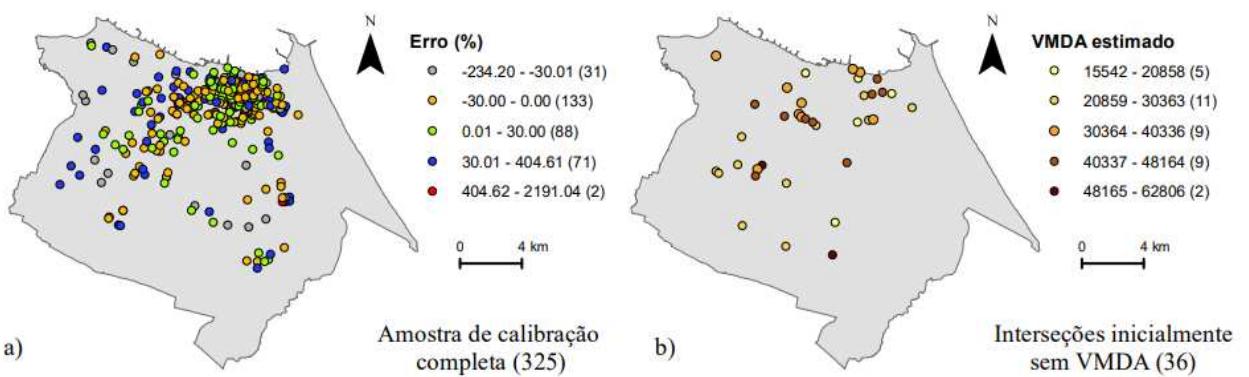
Os resultados da equação de tendência linear são condizentes com o esperado: quanto maior o somatório do número de faixas, maior o volume de tráfego na interseção; e o VDMA é maior em interseções semaforizadas em comparação com as que não possuem semáforo. Os coeficientes dos dois preditores aumentou na amostra de calibração com apenas 70% do banco de dados original. Em se tratando dos parâmetros do semivariograma teórico, nota-se um expressivo grau de aleatoriedade em interseções muito próximas entre si (efeito pepita). Por outro lado, o alcance revela que interseções localizadas dentro de um raio de 777 metros e 500 metros no primeiro e segundo cenários, respectivamente, são espacialmente dependentes. Tais interseções serão utilizadas para a estimativa do VDMA em uma interseção não amostrada.

A Krigagem Universal apresentou um bom desempenho no que se refere às medidas de erro. Além de não haver um aumento significativo no erro ao remover 97 interseções do banco de dados original, a amostra de validação teve métricas de erro ainda melhores que as amostras de calibração do cenário base completo e com apenas 70% das interseções. Um valor de aproximadamente 20%, para a mediana do erro absoluto em porcentagem, revela que metade das interseções mostraram um erro inferior a 20% do VDMA real.

As métricas de desempenho obtidas para o presente estudo de caso foram melhores que outros trabalhos que também utilizaram Krigagem para a estimativa do VDMA. O estudo de caso de Chi e Zheng (2013) apresentou um erro absoluto médio de 76,11%. Selby e Kockelman (2013), que utilizaram um número maior de variáveis explicativas, obtiveram um erro variando entre 55,8% e 63,1% em cinco dos seis estudos de caso propostos por eles. Por outro lado, o maior valor de MAPE encontrado no presente estudo de caso foi de 50,26%. Essa porcentagem também é ligeiramente menor do que o erro de um dos cenários analisados por Marques et al. (2023).

A variação espacial do erro em porcentagem na modelagem do cenário base é mostrada na Figura 4a. Para ilustrar a funcionalidade da Krigagem Universal, 36 interseções sem informação de volume de tráfego tiveram seu VDMA estimado a partir dos parâmetros do cenário base (Tabela 02). Os resultados desta estimativa são apresentados na Figura 4b.

Figura 4: (a) variação espacial do erro em porcentagem; (b) estimativa do VDMA em interseções não amostradas a partir de Krigagem Universal



Fonte: elaborado pelo autor.

A maioria das interseções (68%) teve erro entre -30% a 30% com uma maior ocorrência de subestimação dentro dessa faixa. Porém, considerando o banco de dados completo, o número de vezes em que a Krigagem Universal subestimou o VDMA foi similar ao número de vezes em que houve superestimação, embora os erros de superestimação tenham alcançado valores maiores. Nota-se que o centro concentra uma maioria de interseções na faixa de -30% a 30% de erro, enquanto que erros mais substanciais podem ser vistos em regiões periféricas, onde a densidade de dados amostrados é menor e acaba afetando o poder preditivo do modelo.

Sobrepondo a Figura 4a com a Figura 3a, percebe-se que a interseção com erro na faixa vermelha possui VDMA relativamente pequeno (situado na primeira faixa de valores), porém está bem próxima de uma interseção com intenso volume de tráfego (última faixa de valores). Provavelmente, a disparidade entre os valores de VDMA na vizinhança muito próxima não pôde ser adequadamente capturada pela Krigagem Universal, o que acabou influenciando negativamente a estimativa de VDMA na interseção de menor volume de tráfego.

Após a validação da Krigagem Universal para o ano de 2011, o método foi estendido para os anos de 2010 a 2019 com o objetivo de estimar VDMA para o período completo. A coleta e a preparação dos dados seguiram o mesmo processo aplicado em 2011. O número de observações por ano variou entre 210 e 100 interseções, dependendo da disponibilidade de dados e da qualidade das contagens veiculares. Interseções com dados incompletos foram removidas para assegurar a integridade dos resultados. A Tabela 4 apresenta os resultados de MAPE e RMSE para modelagem do VDMA, com o cenário base, em interseções de Fortaleza a partir da Krigagem Universal para os anos de 2010 a 2019.

Tabela 4: RMSE da Krigagem Universal para a modelagem do VDMA em interseções entre 2010 a 2019.

Cenário Base		
Ano	MAPE (%)	RMSE
2010	34,00	11.909,19
2011	44,07	8.838,93
2012	20,40	10.393,87
2013	37,55	14.493,58
2014	21,34	10.357,64
2015	20,01	9.187,30
2016	19,34	7.296,09
2017	17,51	7.223,97
2018	33,23	10.757,83
2019	35,10	15.116,90

Fonte: elaborado pelo autor.

A Krigagem Universal foi então aplicada a cada ano, ajustando os parâmetros do semivariograma e do modelo de tendência conforme necessário. As estimativas de VDMA foram comparadas com os dados reais disponíveis para validar o desempenho do modelo em cada ano. O valor médio do MAPE para os anos estudados foi de 28,26%, enquanto o RMSE resultou em 10.748,49.

Desta forma, os resultados mostraram que a Krigagem Universal manteve um bom desempenho ao longo dos anos, com erros de estimativa consistente. A análise temporal revelou padrões de aumento no volume de tráfego nas áreas centrais de Fortaleza e variações nas regiões periféricas, refletindo mudanças urbanas e na infraestrutura de trânsito.

#### 4.3 Desenvolvimento e Calibração das Funções de Desempenho da Segurança Viária

Foram desenvolvidos e avaliados três modelos distintos para previsão do número total de sinistros. O primeiro modelo foi construído considerando apenas a variável VDMA. No segundo modelo, além de VDMA, foi incluído o número de faixas como variável adicional. Por fim, o terceiro modelo foi expandido para incluir não apenas VDMA e número de faixas, mas também o número de pistas da via como parâmetros de predição.

Para cada um desses modelos, foram estimados os parâmetros de AIC,  $X^2$ ,  $X^2_{crítico}$  e  $-2l$  e realizadas análises dos resultados obtidos. Na análise comparativa dos três modelos de previsão de sinistros desenvolvidos, observou-se que o Modelo 02 apresentou os melhores resultados de ajuste. Isso foi determinado com base na métrica de critério de informação *AIC* e no  $-2l$ . No Modelo 02, tanto o *AIC* quanto o  $-2l$  foram os menores entre os modelos

avaliados, indicando, respectivamente, um modelo mais equilibrado (viés e variância) e um melhor ajuste aos dados observados. Além disso, o valor  $X^2$  do Modelo 02 foi inferior ao valor do  $X^2_{crítico}$ , o que reforça a adequação do modelo aos dados experimentais e a validade de suas previsões (IC=95% - A variância assumida para o modelo compatível com a variância dos dados). O modelo 2 apresentou também um bom ajuste nos dados de testes com um  $R^2$  de 0,78 mostrando sua capacidade de generalização.

Considerando a formulação geral predominante para as FDSV em interseções e os coeficientes estimados, o Modelo 2 foi representado pela seguinte expressão matemática.

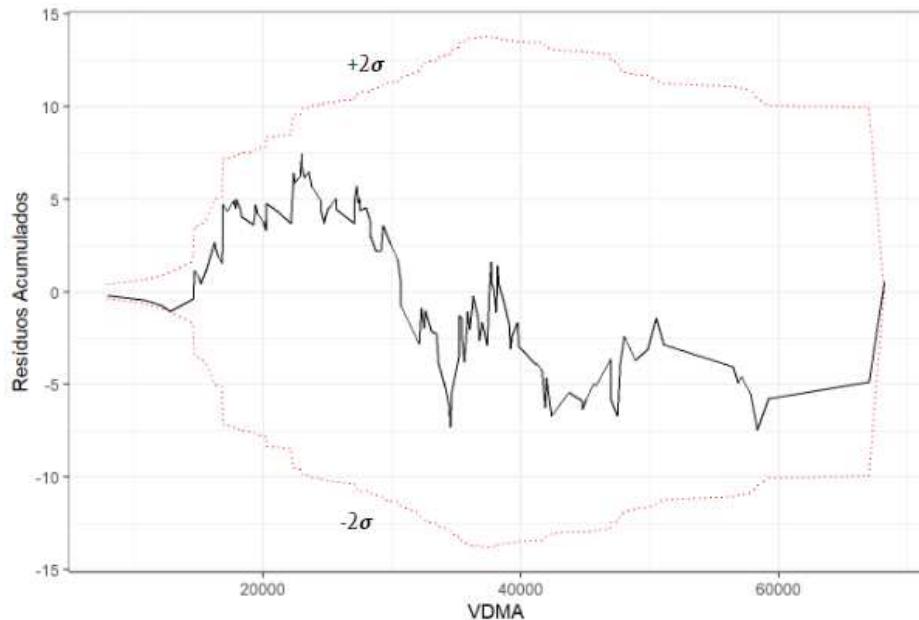
$$E(K) = 1,7277689 \times 10^{-5} \cdot VDMA^{0,9553143} \cdot e^{(0,0929628 \cdot Nfaixas)} \quad (17)$$

em que:

$E(K)$ : número esperado de sinistros no ano de 2011 para interseções semaforizadas

Na Figura 5, o gráfico *Cure Plot* do Modelo 2, para previsão de sinistros com vítimas feridas e fatais, ilustra o comportamento dos resíduos do modelo em função do VDMA.

Figura 5: *Cure plot* - Modelo 02



Fonte: elaborado pelo autor.

Pela análise do gráfico *Cure plot*, a FDSV apresentou-se satisfatória, com os resíduos acumulados (linhas contínuas) oscilando em torno de zero, caracterizando um comportamento de "random walk". Os resíduos não ultrapassaram os limites de dois desvios padrões (linha

tracejada) e terminaram próximos a zero, indicando uma boa adequação do modelo.

No processo de transferência temporal das FDSVs, é importante considerar diversos fatores que podem impactar a precisão das previsões, como mudanças no processo de coleta do banco de dados e outros ajustes relevantes. Esses fatores são formalmente incorporados através da correção do intercepto para o ano a ser transferido, utilizando o coeficiente Desta forma, em posse da FDSV para o ano de 2011, a função foi calibrada temporalmente para os anos em estudo, e foram calculados os valores de calibração  $C_x$  conforme apresentado na Tabela 5. A Tabela mostra os coeficientes  $C_x$  para cada ano analisado, aplicados através da equação 02. O processo de transferência temporal, detalhado na seção de metodologia, envolveu a aplicação desses coeficientes para ajustar as previsões e melhorar a precisão do modelo ao longo do tempo.

Tabela 5: Valores de  $C_x$  para cada ano

Ano	Sinistros Modelados	Sinistros Observados	Cx
2010	214	240	1,121
2012	215	259	1,205
2013	220	194	0,882
2014	225	133	0,591
2015	229	274	1,197
2016	236	330	1,398
2017	242	267	1,103
2018	250	221	0,884
2019	253	223	0,881

Fonte: elaborado pelo autor.

De acordo com a Tabela 4, percebe-se uma oscilação nos dados dos sinistros observados, onde há um aumento no início da série histórica e se finda com uma redução. Também é possível verificar uma diminuição no número de sinistros observados para o ano de 2014. Nesse período, os registros de sinistros com vítimas não foram consolidados, pois as fontes dos órgãos de saúde não compartilharam os dados.

O valor de  $C_x$  foi então aplicado ao valor de intercepto na FDSV de 2011, resultando na geração de novas FDSV, ajustada para os anos analisados. A Tabela 6 apresenta como essa equação foi representada para cada ano específico.

Tabela 6: Valores do Intercepto para cada ano da FDSV

FDSV	Intercepto
E{K}201 0	1,9377E-05
E{K}2011	1,7278E-05
E{K}201 2	2,0814E-05
E{K}201 3	1,5236E-05
E{K}201 4	1,0213E-05
E{K}201 5	2,0673E-05
E{K}201 6	2,4159E-05
E{K}201 7	1,9063E-05
E{K}201 8	1,5273E-05
E{K}201 9	1,5229E-05

Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.4 Aplicação do EAD/MEB

A aplicação do EAD/MEB foi dividida em 4 etapas, para entidades compostas, conforme previsto por Hauer (2002).

##### 4.4.1 Etapa 01 - Estimativa de $\lambda(j)$ e $\pi(j)$

Na Etapa 01 do estudo, foram estimadas as variáveis  $\lambda(j)$  e  $\pi(j)$ , fundamentais para a análise da segurança das entidades tratadas ( $j$ ). Essas variáveis foram estimadas para cada uma das 36 interseções analisadas antes e depois da aplicação das metodologias propostas por Hauer (2002). Vale ressaltar que o presente estudo foca no efeito global da intervenção, adequadamente representado pela análise com entidades compostas.

- O valor de  $\lambda(j)$ , que representa a segurança de uma entidade tratada  $j$  no período “depois”, foi de **292** sinistros. Este valor reflete o nível de segurança observado nas entidades após a implementação do tratamento.
- O valor de  $\pi(j)$ , que estima a segurança da entidade tratada no período “depois”, caso o tratamento não tivesse sido aplicado, foi de **368** sinistros. Este valor representa o nível de segurança que as entidades teriam experimentado no cenário sem tratamento.

#### 4.4.2 Etapa 02 - Estimativa de $VAR\{\hat{\lambda}(j)\}$ e $VAR\{\hat{\pi}(j)\}$

Na segunda etapa, foram estimadas as variâncias associadas às variáveis  $\lambda(j)$  e  $\pi(j)$  as 36 interseções analisadas. Essas variâncias fornecem informações sobre a dispersão das estimativas obtidas e são essenciais para avaliar a precisão dos resultados da Etapa 01.

- $VAR\{\lambda(j)\}$ : Para a variável  $\lambda(j)$ , que representa a segurança de uma entidade tratada  $j$  no período pós-tratamento, assume-se que o número de sinistros segue uma distribuição de Poisson. Sob essa suposição, a variância de  $\lambda(j)$  é igual ao próprio valor de  $\lambda(j)$ . Portanto, a estimativa de  $VAR\{\lambda(j)\}$  é igual ao valor de  $\lambda(j)$ . Com base nos 36 cruzamentos analisados, onde  $\lambda(j)$  foi de **292**, a variância estimada para  $\lambda(j)$  é também **292**.
- $VAR\{\pi(j)\}$ : Para a variável  $\pi(j)$ , que representa a segurança estimada no cenário sem tratamento, a estimativa da variância foi obtida a partir do valor do produto entre  $r_c(j)^2$  e a variância de  $\kappa(j)$ . A estimativa de  $VAR\{\pi(j)\}$  foi de **187**.

A Tabela 7 apresenta as interseções avaliadas, com os seus respectivos valores de  $\lambda(j)$ ,  $\pi(j)$ ,  $VAR\{\lambda(j)\}$  e  $VAR\{\pi(j)\}$ .

Tabela 7: Valores de  $\lambda(j)$ ,  $\pi(j)$ ,  $VAR\{\lambda(j)\}$  e  $VAR\{\pi(j)\}$  para as 36 interseções analisadas – EAD/MEB

Id	Locais	Cruzamento	Período "antes"					Período "depois"				Etapas 01 e 02			
			$\Sigma k$	E{k} - antes	Var{k}	$\alpha$ (MEB)	E{K/K}	Var{k}	$\sum \lambda$	E{k} - depois	Rc	$\pi(j)$	Var{π(j)}	$\lambda(j)$	Var{λ(j)}
1	AV. SILAS MUNGUBA X AV. BERNARDO MANOEL		18	12,4	13,76	0,47	15	8	48	15,84	1,28	20	13	48	48
2	AV. SILAS MUNGUBA X AV. GERMANO FRANCK		13	12,9	14,98	0,46	13	7	14	15,49	1,20	16	10	14	14
3	AV. CARNEIRO DE MENDONÇA X AV. LINEU MACHADO		4	12,3	13,44	0,48	8	4	1	4,89	0,40	3	1	1	1
4	AV. THOMAZ COELHO X AV. CASTELO DE CASTRO		10	15,7	22,08	0,42	12	7	7	17,50	1,11	14	9	7	7
5	AV. GODOFREDO MACIEL X AV. GERMANO FRANCK		4	12,4	13,73	0,47	8	4	8	15,13	1,22	10	6	8	8
6	AV. DEP. MOREIRA DA ROCHA X AV. RUI BARBOSA		17	9,3	7,79	0,55	13	6	2	11,30	1,21	16	9	2	2
7	AV. EDUARDO GIRÃO X AV. SILVA JUNIOR		10	12,5	13,99	0,47	11	6	5	14,70	1,18	13	8	5	5
8	RUA JÚLIO ABREU X RUA OITO DE SETEMBRO		5	12,1	13,04	0,48	8	4	5	13,06	1,08	9	5	5	5
9	AV. SANTOS DUMONT X RUA ALMEIDA PRADO		2	12,7	14,43	0,47	7	4	3	12,33	0,97	7	4	3	3
10	AV. COSTA E SILVA X RUA CEL TIBÚRCIO		15	15,2	20,78	0,42	15	9	12	15,06	0,99	15	8	12	12
11	AV. AUGUSTO DOS ANJOS X RUA JÚLIO BRAGA		29	13,3	15,78	0,46	22	12	23	13,87	1,04	23	13	23	23
12	RUA GUILHERME ROCHA X RUA PADRE MORORÓ		2	11,6	12,12	0,49	7	3	4	13,08	1,12	8	4	4	4
13	AV. JOSÉ BASTOS X RUA DELMIRO DE FARIAS		10	14,2	18,04	0,44	12	7	5	15,39	1,08	13	8	5	5
14	AV. 13 DE MAIO X AV. UNIVERSIDADE		14	14,9	19,95	0,43	14	8	10	14,44	0,97	14	8	10	10
15	AV. PONTES VIEIRA X RUA VICENTE LEITE		7	12,5	13,96	0,47	10	5	4	8,53	0,68	7	2	4	4
16	AV. GODOFREDO MACIEL X RUA ANT BANDEIRA		12	14,5	18,77	0,44	13	7	7	14,42	1,00	13	7	7	7
17	AV. DOM LUÍS X AV. VIRGÍLIO TÁVORA		10	14,2	18,05	0,44	12	7	12	15,23	1,07	13	8	12	12
18	AV. JOVITA FEITOSA X AV. HUMBE MONTE		16	16,9	25,47	0,40	16	10	13	14,21	0,84	14	7	13	13
19	AV. BEZERRA DE MENEZES X RUA RIBEIRO DA SILVA		10	16,2	23,58	0,41	13	7	1	12,66	0,78	10	5	1	1
20	AV. RAUL BARBOSA X RUA MAJOR ARAÚJO AGUIAR		0	16,9	25,49	0,40	7	4	6	12,57	0,74	5	2	6	6
21	RUA VERBENA X RUA VITAL BRASIL		10	15,3	20,82	0,42	12	7	6	10,71	0,70	9	3	6	6
22	AV. SANTOS DUMONT X AV. DESEMBARGADOR MOREIRA		10	14,1	17,89	0,44	12	7	15	13,00	0,92	11	6	15	15
23	AV. EDUARDO GIRÃO X RUA JÚLIO CÉSAR		10	16,3	23,80	0,41	13	7	4	11,38	0,70	9	4	4	4
24	AV. EDUARDO GIRÃO X RUA DAMASCENO GIRÃO		3	17,3	26,69	0,39	9	5	1	10,60	0,61	5	2	1	1

25	AV. RAIMUNDO GIRÃO X AV. RUI BARBOSA	5	11,4	11,62	0,50	8	4	7	13,92	1,22	10	6	7	7	
26	AV.CEL CARVALHO X RUA HERMES P PARAHYBA	13	17,4	27,06	0,39	15	9	6	15,27	0,88	13	7	6	6	
27	AV. EDUARDO GIRÃO X AV. DOS EX EXPEDICIONÁRIOS	26	19,1	32,77	0,37	23	15	14	10,63	0,56	13	5	14	14	
28	RUA ANSELMO NOGUEIRA X RUA EMÍLIO DE MENEZES	26	16,8	25,15	0,40	22	13	6	9,16	0,55	12	4	6	6	
29	AV. HIST. RAIMUNDO GIRÃO X RUA ILDEFONSO ALBANO	5	16,0	23,01	0,41	10	6	8	13,80	0,86	8	4	8	8	
30	RUA ISAC AMARAL X RUA JOAQUIM NABUCO	6	15,7	22,01	0,42	10	6	0	4,96	0,32	3	1	0	0	
31	AV. EDUARDO GIRÃO X AV. LUCIANO CARNEIRO	21	19,4	33,62	0,37	20	13	12	10,28	0,53	11	4	12	12	
32	AV. ABOLIÇÃO X AV DES. MOREIRA	16	20,5	37,50	0,35	18	11	12	8,66	0,42	7	2	12	12	
33	AV. DEP PAULINO ROCHA X AV. POMPÍLIO GOMES	9	19,0	32,38	0,37	13	8	1	0,59	0,03	0	0	1	1	
34	AV. PONTES VIEIRA X AV VIRGÍLIO TÁVORA	8	19,3	33,43	0,37	12	8	4	7,97	0,41	5	1	4	4	
35	AV. PRESIDENTE COSTA E SILVA X CIDADE JARDIM	23	20,2	36,46	0,36	22	14	4	6,79	0,34	7	2	4	4	
36	RUA TORRES CÂMARA X RUA TIBÚRCIO CAVALCANTE	9	17,5	27,30	0,39	12	8	2	6,08	0,35	4	1	2	2	
												<b>368</b>	<b>187</b>	<b>292</b>	<b>292</b>
												$\Sigma\pi(j)$	$\Sigma\text{Var}\{\pi(j)\}$	$\Sigma\lambda(j)$	$\Sigma\text{Var}\{\lambda(j)\}$

Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.4.3 Etapa para entidade composta

Nesta etapa, exclusiva para entidades compostas, é realizado o somatório das variáveis:  $\lambda$ ,  $\pi$ ,  $VAR\{\lambda(j)\}$  e  $VAR\{\pi(j)\}$ . Conforme já mencionados nas duas etapas anteriores, os valores do somatório para as 36 interseções são:

- $\Sigma\lambda(j)$ : 292
- $\Sigma\pi(j)$ : 368
- $\Sigma VAR\{\lambda(j)\}$ : 479
- $\Sigma VAR\{\pi(j)\}$ : 187

#### 4.4.4 Etapa 03 - Estimativa $\delta$ e $\theta$

Na etapa 04, será estimado o  $\delta$ , que representa a redução no período "depois" do número esperado de sinistro alvo. Além disso, será determinado o  $\theta$ , que é a razão entre o que a segurança seria com o tratamento e o que teria sido sem o tratamento.

- $\delta$ : Para a variável  $\delta$ , que representa a redução na frequência esperada de sinistros alvo por unidade de tempo, foi encontrado o valor de **76**. Este é resultado é calculado a partir da diferença entre  $\pi(j)$  e  $\lambda(j)$ .
- $\theta$ : O valor de  $\theta$  estimado foi de 0,793, assim representando o índice de eficácia, ou seja, a proporção de segurança alcançada com o tratamento em relação ao que seria esperado sem ele.

Com base na fórmula “ $100 \times (1 - \theta)$ ” para calcular a porcentagem de redução na frequência esperada de sinistros, sendo que  $\theta$  é 0,793, a porcentagem de redução é:

$$100 * (1 - 0,793) = 20,7\%.$$

Com base no valor obtido, observou-se uma redução de 20,7% na frequência esperada de sinistros com o tratamento.

#### 4.4.5 Etapa 04 - Estimativa de $VAR\{\hat{\delta}\}$ e $VAR\{\hat{\theta}\}$

Na quarta e última etapa, através da utilização dos valores de  $\lambda(j)$  e  $\pi(j)$  da primeira etapa e  $VAR\{\lambda(j)\}$  e  $VAR\{\pi(j)\}$  da segunda etapa, é possível coletar os seguintes resultados:

- $VAR\{\hat{\delta}\}$ : a  $VAR\{\hat{\delta}\}$  é estimada a partir da soma entre  $VAR\{\pi(j)\}$  e  $VAR\{\lambda(j)\}$ , assim representando o valor de **479**.

- $VAR\{\hat{\theta}\}$ : O valor encontrado para  $VAR\{\hat{\theta}\}$  é igual a **0,0039**.

#### 4.5 Aplicação do EAD/*Naïve*

Para aplicação do Método Naïve em que as entidades apresentam janelas temporais distintas, é necessário estimar a razão das durações calculadas pela duração do período “depois” sobre a duração do período “antes” ( $rd$ ). Neste estudo, foi calculado um  $r_d$  para cada uma das 36 interseções. A partir disto, com aplicação do modelo 4 etapas, foram estimados os seguintes coeficientes:

##### 4.5.1 Etapa 01 - Estimativa de $\hat{\lambda}(j)$ e $\hat{\pi}(j)$

- O valor de  $\hat{\lambda}(j)$  é igual ao somatório dos sinistros do período “depois”, totalizando **292** sinistros.
- O valor de  $\hat{\pi}(j)$  é calculado pelo o produto do  $r_d$  pela a quantidade de sinistros no período “antes”. O valor encontrado foi de **331** sinistros.

##### 4.5.2 Etapa 02 - Estimativa de $V\hat{A}R\{\hat{\lambda}(j)\}$ e $V\hat{A}R\{\hat{\pi}(j)\}$

- $V\hat{A}R\{\hat{\lambda}(j)\}$ : a estimativa de  $V\hat{A}R\{\hat{\lambda}(j)\}$  é igual ao valor de  $\hat{\lambda}(j)$ . Dessa forma, o valor é de **292**.
- $V\hat{A}R\{\hat{\pi}(j)\}$ : a variância de  $\hat{\pi}(j)$  é obtida a partir do valor do produto entre o somatório de  $r_d^2$  e a quantidade de sinistros no período “antes”. O valor encontrado foi de **312**.

A Tabela 8 apresenta as interseções avaliadas, com os seus respectivos valores de  $\lambda(i)$ ,  $\pi(i)$ ,  $VAR\{\lambda(i)\}$  e  $VAR\{\pi(i)\}$  da aplicação do Método *Naïve*.

Tabela 8: Valores de  $\lambda(i)$ ,  $\pi(i)$ ,  $VAR\{\lambda(i)\}$  e  $VAR\{\pi(i)\}$  para as 36 interseções analisadas – EAD/*Naïve*.

	Locais	<i>Naïve - Etapa 01 e 02</i>					
	Cruzamento	$\Sigma K$	rd	$\pi(i)$	$Var\{\pi(i)\}$	$\Sigma \lambda$	$Var\{\lambda(i)\}$
1	AV. SILAS MUNGUBA X AV. BERNARDO MANOEL	18	1,41	25	36	48	48
2	AV. SILAS MUNGUBA X AV. GERMANO FRANCK	13	1,27	16	21	14	14
3	AV. CARNEIRO DE MENDONÇA X AV. LINEU MACHADO	4	0,40	2	1	1	1
4	AV. THOMAZ COELHO X AV. CASTELO DE CASTRO	10	1,19	12	14	7	7
5	AV. GODOFREDO MACIEL X AV. GERMANO FRANCK	4	1,19	5	6	8	8
6	AV. DEP. MOREIRA DA ROCHA X AV. RUI BARBOSA	17	1,19	20	24	2	2
7	AV. EDUARDO GIRÃO X AV. SILVA JUNIOR	10	1,19	12	14	5	5
8	RUA JULIO ABREU X RUA OITO DE SETEMBRO	5	1,05	5	6	5	5
9	AV. SANTOS DUMONT X RUA ALMEIDA PRADO	2	0,84	2	1	3	3
10	AV. COSTA E SILVA X RUA CEL TIBURCIO	15	1,03	16	16	12	12
11	AV. AUGUSTO DOS ANJOS X RUA JULIO BRAGA	29	1,03	30	31	23	23
12	RUA GUILHERME ROCHA X RUA PADRE MORORO	2	1,03	2	2	4	4
13	AV. JOSE BASTOS X RUA DELMIRO DE FARIAS	10	1,00	10	10	5	5
14	AV. 13 DE MAIO X AV. UNIVERSIDADE	14	0,97	14	13	10	10
15	AV. PONTES VIEIRA X RUA VICENTE LEITE	7	0,60	4	3	4	4
16	AV. GODOFREDO MACIEL X RUA ANT BANDEIRA	12	0,93	11	10	7	7
17	AV. DOM LUIS X AV. VIRGILIO TAVORA	10	1,11	11	12	12	12
18	AV. JOVITA FEITOSA X AV. HUMBE MONTE	16	0,84	14	11	13	13
19	AV. BEZERRA DE MENEZES X RUA RIBEIRO DA SILVA	10	0,76	8	6	1	1
20	AV. RAUL BARBOSA X RUA MAJOR ARAÚJO AGUIAR	0	0,75	0	0	6	6
21	RUA VERBENA X RUA VITAL BRASIL	10	0,69	7	5	6	6
22	AV. SANTOS DUMONT X AV. DESEMBARGADOR MOREIRA	10	1,00	10	10	15	15
23	AV. EDUARDO GIRÃO X RUA JÚLIO CÉSAR	10	0,66	7	4	4	4
24	AV. EDUARDO GIRÃO X RUA DAMASCENO GIRÃO	3	0,59	2	1	1	1
25	AV. RAIMUNDO GIRÃO X AV. RUI BARBOSA	5	1,31	7	9	7	7
26	AV. CEL CARVALHO X RUA HERMES P PARAHYBA	13	0,91	12	11	6	6
27	AV. EDUARDO GIRÃO X AV. DOS EX EXPEDICIONÁRIOS	26	0,55	14	8	14	14
28	RUA ANSELMO NOGUEIRA X RUA EMÍLIO DE MENEZES	26	0,55	14	8	6	6
29	AV. HIST. RAIMUNDO GIRÃO X RUA ILDEFONSO ALBANO	5	0,84	4	4	8	8
30	RUA ISAC AMARAL X RUA JOAQUIM NABUCO	6	0,30	2	1	0	0
31	AV. EDUARDO GIRÃO X AV. LUCIANO CARNEIRO	21	0,53	11	6	12	12
32	AV. ABOLIÇÃO X AV DES. MOREIRA	16	0,48	8	4	12	12
33	AV. DEP PAULINO ROCHA X AV. POMPÍLIO GOMES	9	0,04	0	0	1	1
34	AV. PONTES VIEIRA X AV VIRGÍLIO TÁVORA	8	0,42	3	1	4	4
35	AV. PRESIDENTE COSTA E SILVA X CIDADE JARDIM	23	0,39	9	3	4	4
36	RUA TORRES CÂMARA X RUA TIBÚRCI CAVALCANTE	9	0,37	3	1	2	2
				33		29	
		408	29,40	1	312	2	292

Fonte: elaborado pelo autor.

Os próximos dois passos são sempre iguais conforme definidos por Hauer (2002). Dessa forma, as expressões serão repetidas, conforme visto na Etapa 03 e Etapa 04 do Método EB.

#### 4.5.3 Etapa 03 - Estimativa $\delta$ e $\theta$

- $\delta$ : Para a variável  $\delta$  foi encontrado o valor de **39**. Este é resultado é calculado a partir da diferença entre  $\hat{\lambda}(j)$  e  $\hat{\pi}(j)$
- $\theta$ : O valor de  $\theta$  estimado foi 0,880.

Com base nos valores encontrados, a porcentagem de redução é:  $100 * (1 - 0,88) = 22\%$ . Com base no valor encontrado, é possível dizer que houve uma redução de 22% na frequência esperada de sinistros com o tratamento.

#### 4.5.4 Etapa 04 - Estimativa de $VAR\{\hat{\delta}\}$ e $VAR\{\hat{\theta}\}$

- $VAR\{\hat{\delta}\}$ : a variância de  $\{\hat{\delta}\}$  é igual a **604**.
- $VAR\{\hat{\theta}\}$ : O valor encontrado para  $VAR\{\hat{\theta}\}$  é igual a **0,0048**.

### 4.6 Aplicação do EAD/CG

Para aplicação do Método com Grupo de Comparação foram escolhidas 36 novas interseções que se assemelham com as características geométricas e operacionais das 36 interseções do grupo de tratamento. As interseções selecionadas foram:

- Av. Pres. Costa e Silva x Av. Godofredo Maciel;
- Rua Eduardo Perdigão x Av. Germano Frank;
- Av. Carneiro de Mendonça x Av. João Pessoa;
- Av. Pres. Costa e Silva x Av. Juscelino Kubitschek
- Av. Osório de Paiva x Rua Gomes Brasil;
- Rua Rui Barbosa x Rua Ten. Benévolo;
- Av. Eduardo Girão x Av. Dep. Osvaldo Studart;
- Av. Dom Luís x Rua Frei Mansueto;
- Av. Santos Dumont x Rua Otávio Lobo;
- Av. Waldir Diogo x Rua Alfredo Mamede;
- Av. Augusto dos Anjos x Rua Seixas Correia
- Rua São Paulo x Rua Pe. Mororó;

- Av. José Bastos x Rua Porfírio Sampaio;
- Av. 13 de Maio x Rua Sen. Pompeu;
- Av. Pontes Vieira x Rua Barbosa de Freitas;
- Av. Nereu Ramos x Av. Godofredo Maciel;
- Av. Santos Dumont x Av. Virgílio Távora;
- Av. Jovita Feitosa x Av. José Jatahy;
- Av. Bezerra de Menezes x Rua José Barcelos;
- Av. Alberto Craveiro x Rua Pedro Dantas;
- Av. Vital Brasil x Rua Anselmo Nogueira;
- Av. Santos Dumont x Av. Br. de Studart;
- Av. Eduardo Girão x Av. João Pessoa;
- Av. Eduardo Girão x Rua Jorge Dummar;
- Rua Rui Barbosa x Av. Monsenhor Tabosa;
- Av. Cel Carvalho x Rua Raimundo Frota;
- Av. dos Expedicionários x Av. Borges de Melo;
- Rua Verbena x Rua Emílio de Menezes;
- Av. Hist. Raimundo Girão x Rua João Cordeiro;
- Rua Eduardo Bezerra x Rua Cap. Melo;
- Av. Borges de Melo x Av. Luciano Carneiro;
- Av. Sen. Virgílio Távora x Av. da Abolição;
- Av. Silas Munguba x Av. Heróis do Acre;
- Av. Sen. Virgílio Távora x Av. Antonio Sales;
- Av. Pres. Costa e Silva x Av. Evandro Ayres de Moura;
- Rua Torres Câmara x Rua Osvaldo Cruz.

Com base nas interseções do grupo de tratamento e do grupo de comparação, foram encontrados os seguintes resultados:

#### 4.6.1 Etapa 01 - Estimativa de $\hat{\lambda}(j)$ e $\hat{\pi}(j)$

- O valor de  $\hat{\lambda}(j)$  é igual ao somatório dos sinistros do período “depois”, totalizando **292**.
- O valor de  $\hat{\pi}(j)$  encontrado foi de **380**.

#### 4.6.2 Etapa 02 - Estimativa de $V\hat{A}R\{\hat{\lambda}(j)\}$ e $V\hat{A}R\{\hat{\pi}(j)\}$

- $\hat{V\bar{A}R}\{\hat{\lambda}(j)\}$ : a estimativa de  $\hat{V\bar{A}R}\{\hat{\lambda}(j)\}$  é igual ao valor de  $\hat{\lambda}(j)$ . Dessa forma, o valor é de **292**;
- $\hat{V\bar{A}R}\{\hat{\pi}(j)\}$ : a variância de  $\hat{\pi}(j)$  é obtida foi de **1343**.

#### 4.6.3 Etapa 03 - Estimativa $\delta$ e $\theta$

- $\delta$ : Para a variável  $\delta$  foi encontrado o valor de **88**;
- $\theta$ : O valor de  $\theta$  estimado foi 0,7604.

Com base nos valores encontrados, a porcentagem de redução é:  $100 * (1 - 0,7604) = 23,96\%$ . Com base no valor encontrado, é possível dizer que houve uma redução de 23,96% na frequência esperada de sinistros com o tratamento.

#### 4.6.4 Etapa 04 - Estimativa de $VAR\{\hat{\delta}\}$ e $VAR\{\hat{\theta}\}$

- $VAR\{\hat{\delta}\}$ : a variância de  $\{\hat{\delta}\}$  é igual a **1635**.
- $VAR\{\hat{\theta}\}$ : O valor encontrado para  $VAR\{\hat{\theta}\}$  é igual a **0,0072**.

Elaborado os estudos antes e depois, através dos três métodos supracitados, a Tabela 9 resume os valores encontrados:

Tabela 9: Resultados dos métodos empregados nos estudos antes e depois

Método	$\delta$	$VAR\{\hat{\delta}\}$	$\theta$	$VAR\{\hat{\theta}\}$	Redução com o Tratamento
<i>Naïve</i>	39	604	0,88	0,0048	12,00%
Grupo de Comparação	88	1635	0,76	0,0072	23,96%
Empírico de Bayes	76	479	0,79	0,0039	20,70%

Fonte: elaborado pelo autor.

Para verificar eficácia do método é necessária enfatizar a importância de considerar a variância ao analisar o valor de  $\theta$ , refletindo a precisão da estimativa. Se a variância for alta, a estimativa de  $\theta$  pode ser imprecisa, o que afeta a confiança na eficácia do tratamento. Além disto, deve-se analisar os intervalos de confiança para verificar a faixa em que  $\theta$  pode variar. Desta forma, a Tabela 10 apresenta os valores das variâncias de  $\theta$  para cada método abordado, com seus respectivos intervalos de confiança.

Tabela 10: Resultados dos métodos empregados nos estudos antes e depois com intervalo de confiança e desvio padrão.

	<b>EAD/<i>Naïve</i></b>	<b>EAD/GC</b>	<b>EAD/MEB</b>
$\bar{\delta}$	39	88	76
$\theta$	<b>0,88</b>	<b>0,76</b>	<b>0,79</b>
Redução	0,12	0,24	0,21
$VAR\{\hat{\delta}\}$	603,55	1635,51	479,09
desv $\{\hat{\delta}\}$	24,57	40,44	21,89
$VAR\{\hat{\theta}\}$	0,0048	0,0072	0,00
desv $\{\hat{\theta}\}$	0,07	0,08	0,06
<b>95% de confiança</b>			
$\bar{\delta}$	-10,39	7,61	31,79
	87,88	169,38	119,35
$\theta$	0,74	0,59	0,67
	1,02	0,93	0,92
Redução	0,26	0,41	0,33
	-0,02	0,07	0,08
<b>66% de confiança</b>			
$\bar{\delta}$	14,18	48,05	53,68
	63,31	128,94	97,46
$\theta$	0,81	0,68	0,73
	0,95	0,85	0,86
Redução	0,19	0,32	0,27
	0,05	0,15	0,14

Fonte: elaborado pelo autor.

O EAD/MEB apresenta uma estimativa de  $\theta$  de 0,79 (redução de 21%) com um desvio padrão baixo, indicando alta precisão e confiabilidade, e um intervalo de confiança relativamente estreito que reforça a consistência da estimativa. Sobre a variabilidade dos resultados de  $\theta$  é possível então afirmar que em 95% das vezes em que esse experimento for repetido, os valores de  $\theta$  estarão entre (0,67 e 0,92).

Em contraste, o EAD/*Naïve*, com uma estimativa de  $\theta$  de 0,88, exibe maior variância e um intervalo de confiança mais amplo, o qual inclui o valor de 1 (efeito nulo da intervenção) para o nível de significância de 95%. Os resultados obtidos pela aplicação do EAD/GC ( $\theta=0,76$ ) considerando sua variabilidade, sugerem uma considerável similaridade com as estimativas de redução obtidas através do EAD/MEB.

Em relação aos EAD/MEB disponíveis em outras jurisdições, os resultados encontrados para Fortaleza, indicam que os DFE tiveram desempenho relativamente similar. Ao todo, cinco estudos (Mahmassani, 2017; Claros et al., 2016; Contini e El-Basyouny, 2016; Llau et al., 2015; de Pauw et. al., 2014) encontraram reduções entre (7% a 19,1%), menores do que o resultado encontrado, enquanto um estudo sugerem que o efeito da DFE foi superestimado (Lord et al., 2014). Dentre os fatores que podem estar associados a essas diferença, algumas hipóteses podem ser levantadas;

- a) Perfil de velocidade nas proximidades da interseção semaforizada: em locais com menor adensamento do uso do solo, menor densidade de interseções por km de via e velocidade limite maior, é possível que o perfil de velocidade média nas proximidades do semáforo sejam maiores e consequentemente, em caso de sinistros, as severidades tendem a aumentar. O efeito do DFE nestas situações pode ser maior;
- b) A configuração geral do projeto de sinalização horizontal e vertical do dispositivo em conjunto com a geometria da interseção podem facilitar a visualização do dispositivo e consequentemente aumentar a taxa de obediência à fiscalização;
- c) O nível de comunicação/divulgação a respeito da instalação e operação dos DFE entre as autoridades gestoras do tráfego e os usuários em geral contribui para a mudança de forma mais duradoura e espacialmente mais abrangente (*general deterrence*) do comportamento violador dos condutores;

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base neste estudo, foi possível obter um conhecimento mais profundo sobre essa abordagem, levando a uma série de conclusões e recomendações que podem servir de orientação para futuros estudos que empreguem o método de estudo "antes" e "depois" aqui apresentado. Nos tópicos a seguir, serão apresentadas as principais conclusões e recomendações desta pesquisa de dissertação.

Para alcançar o objetivo principal deste trabalho, utilizaram-se estimação e calibração de FDSV, bem como a Krigagem Universal como ferramentas para obtenção de dados faltantes. A primeira etapa deste trabalho envolveu a criação de uma base de dados georreferenciados para a cidade de Fortaleza (CE), escolhendo os locais para a aplicação prática da metodologia proposta. Esse processo incluiu o desenvolvimento de bancos de dados geográficos que contêm informações sobre sinistros, características físicas e operacionais da rede viária, e o tráfego de veículos, necessários para a estimativa do volume médio diário anual (VDMA). Os dados faltantes de fluxo veicular foram estimados através de fatores de expansão e da Krigagem Universal.

A técnica de Krigagem Universal demonstrou um bom desempenho em relação às medidas de erro. A amostra de validação apresentou métricas de erro ainda melhores do que as amostras de calibração em diferentes cenários. Mesmo utilizando apenas dois preditores, a mediana do erro absoluto em porcentagem variou entre 20% a 35%, indicando que metade das interseções apresentou um erro inferior a 35% do VDMA real, para o ano de 2010 a 2019.

Os resultados demonstram que o uso da Krigagem Universal na estimação do VDMA em interseções possibilita a estimação dos volumes veiculares em situações em que haja dados faltantes. Os resultados também alertam para a importância de uma coleta de dados de tráfego mais uniformemente distribuída no espaço a fim de gerar estimativas precisas em pontos não amostrados. Além disso, A krigagem espaço-temporal poderia melhorar os resultados e a aplicabilidade de modelos de previsão ao incorporar simultaneamente a variabilidade espacial e temporal dos dados. Ao modelar tanto a estrutura espacial quanto a evolução ao longo do tempo, essa técnica pode proporcionar estimativas precisas em locais e períodos não amostrados, preenchendo a ausência de dados e capturando padrões temporais que a krigagem tradicional pode não detectar. Além de tudo, com o avanço de sistemas de mapeamento colaborativos, como o *OpenStreetMap*, por exemplo, obter informações que possam ser usadas como preditores do VDMA (número de faixas, presença/ausência de

semáforo, velocidade máxima regulamentada, entre outras) já não representa um custo adicional elevado para a realização da modelagem. Esse fato, somado ao uso de um software de programação aberto e livre (R), potencializa a replicação do método proposto para outras cidades e cenários.

A etapa seguinte consistiu no desenvolvimento das Funções de Desempenho da Segurança Viária (FDSV) utilizando a base de dados consolidada. Primeiramente, foi realizada uma análise exploratória dos dados disponíveis para definir a estrutura dos modelos. Desta forma, foi criada uma FDSV, para sinistros com vítimas feridas e fatais na cidade de Fortaleza para o ano de 2011. Este modelo foi calibrado e validado, empregando o VDMA e o número de faixas em interseções semaforizadas, assim resultando em uma FDSV, na qual foi incorporada ao Método EB.

O método proposto para propor e calibrar as funções revelou-se eficaz ao apresentar resultados satisfatórios nas métricas de erro avaliadas. A precisão alcançada nas previsões de sinistros reforça a importância de considerar essas variáveis específicas na modelagem de segurança viária, contribuindo para melhorar a segurança viária.

A consolidação do uso do método de transferência temporal no contexto brasileiro ainda está em estágios iniciais. Embora promissor, o método de transferência temporal proposto pelo HCM tem desafios relacionados a não recalibração do parâmetro de dispersão, ou seja, é assumido que os dados possuem a mesma dispersão entre os anos. Fatores como estes, dificultam, por exemplo, a aplicação do Método Empírico de Bayes.

A aplicação do método empírico de Bayes em quatro etapas, conforme proposto por Hauer (2002), em 36 interseções semaforizadas em Fortaleza, permitiu a obtenção de valores fundamentais para a análise da segurança viária. Foram calculados os valores de  $\lambda$ ,  $\pi$ , variância de  $\lambda$ , variância de  $\pi$ ,  $\delta$ ,  $\theta$ , variância de  $\delta$  e variância de  $\theta$ . Os valores de  $\lambda$  e  $\pi$  indicam a frequência média de sinistros antes e depois da intervenção, respectivamente. A comparação entre essas frequências, ajustada pelas variâncias correspondentes, permitiu avaliar com precisão o efeito das medidas implementadas. O cálculo de  $\delta$  e  $\theta$ , junto com suas variâncias, forneceu uma visão detalhada das mudanças na segurança viária, permitindo identificar as interseções que mais se beneficiaram das intervenções. As interseções com maiores valores de  $\delta$  e menores variâncias de  $\theta$  mostraram uma redução significativa nos sinistros, indicando a eficácia das medidas de fiscalização.

No entanto, é importante apresentar as razões pelas quais outros métodos podem ter produzido resultados enviesados e as implicações dessas diferenças. Por exemplo, ao considerar o Método Naïve, que resultou em um valor de  $\theta = 0,88$ , a suposição de que o comportamento futuro será idêntico ao passado é questionável por várias razões. O método não leva em consideração mudanças ao longo do tempo, como variações no tráfego, clima, comportamento dos usuários da via e o VDMA. Além disso, fatores como a implementação de outros tratamentos e programas, ajustes na contagem de sinistros por danos materiais, variações na probabilidade de relato de sinistros e a seleção de entidades com históricos de sinistros podem gerar enviesamento. Esses fatores podem impactar a precisão das previsões e indicar que a aplicação do método Naive com uma janela temporal extensa pode não ser adequada para demonstrar as reais mudanças ocorridas.

No caso do Método com Grupo de Comparação, que apresentou um valor de  $\theta = 0,76$ , a situação também suas ponderações. A experiência de Fortaleza com o GC levanta a questão de se a aplicação desse método resultaria em subestimação ou superestimação do efeito. A ausência de consideração para o fenômeno de regressão à média e outros fatores que poderiam ter influenciado o grupo de comparação durante os períodos 'antes' e 'depois' pode ter levado a uma avaliação inadequada. Além disso, a aplicação do GC, considerando a regra implícita de dados até três anos anteriores, poderia limitar o espaço amostral e afetar a validade das previsões.

No que se diz a respeito da aplicação do Método EB, os resultados mostraram que a fiscalização eletrônica de velocidade e de avanço semafórico teve um impacto 20,7% na redução de ocorrências com vítimas feridas e fatais nas interseções analisadas. Essa metodologia demonstrou eficácia para a avaliação de intervenções de segurança viária, oferecendo uma base sólida para a tomada de decisões informadas. Os resultados obtidos reforçam a importância da fiscalização eletrônica como medida preventiva, contribuindo para a redução dos sinistros e promovendo um ambiente mais seguro para os usuários das vias.

Assim, ao incorporar o Método Empírico de Bayes em estudos de "antes" e "depois" no processo de planejamento, espera-se conseguir prevenir certos efeitos negativos causados pelos sinistros de trânsito, reduzindo os custos sociais e econômicos para a sociedade. A metodologia apresentada pode ser utilizada em outras áreas, desde que adaptada às condições locais. A FDSV neste estudo, por exemplo, não deve ser utilizada em sua forma original em outras cidades, pois as características das redes viárias, o comportamento dos

motoristas e a frequência e gravidade dos sinistros podem variar significativamente. Se a calibração de novos modelos não for viável, é aconselhável calcular fatores de ajuste regionais.

Ao demonstrar a eficácia da fiscalização eletrônica de velocidade e de avanço semafórico, espera-se que este trabalho contribua para uma maior adoção dessas tecnologias em diversas regiões do país. Além disso, as conclusões e recomendações aqui apresentadas visam orientar novos estudos que utilizem a abordagem antes e depois com o método empírico de Bayes, fortalecendo a base de evidências para a melhoria contínua da segurança viária no Brasil.

Durante o desenvolvimento do procedimento metodológico para avaliação do efeito da fiscalização eletrônica de velocidade e avanço semafórico em interseções semaforizadas, foram identificados alguns tópicos que podem ser explorados e desenvolvidos futuramente. Recomenda-se:

- a) Ampliar a amostra de entidades viárias e considerar um período de análise ainda mais extenso para obter resultados mais robustos;
- b) Aplicar o Método EB, avaliando o efeito da fiscalização eletrônica de velocidade e avanço semafórico, tendo como sinistro alvo as colisões traseiras e transversais em interseções semaforizadas. Nesse caso é necessário elaborar uma nova FDSV para tal tipo de sinistro.
- c) Analisar o efeito da readequação de velocidade de 60 km/h para 50 km/h em avenidas da cidade de Fortaleza, aplicando o Método EB, tendo como sinistro alvo a sinistros com vítimas feridas e fatais.

## REFERÊNCIAS

- AL-GHAMDI, A. S. Analysis of traffic accidents at urban intersections in Riyadh. **Accident Analysis & Prevention**, Oxford, v. 35, n. 5, p. 717-724, 2003. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/663923>. Acesso em: 04 jun. 2022.
- AASHTO. **Highway Safety Manual**. 1st. Edition. Washington, D.C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010.
- AHMED, M.M.; ABDEL-ATY, M. Evaluation and spatial analysis of automated red-light running enforcement cameras. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, Orlando, Florida, n. 50, pp.130–140, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.07.012>. Acesso em: 19 jun. 2022.
- ALLISON, P. D. **Missing data**. [S.l.: s.n.], v. 136, 2001.
- AL-DEEK, H.; VENKATA, C.; CHANDRA, S. R. **New algorithms for filtering and imputation of real time and archived dual-loop detector data in the I-4 data warehouse**. Washington DC, 2004, v. 1867, p. 116 - 126. Proceedings of the 83rd Transportation Research Board Annual Meeting.
- ASTEF - Associação Técnico-Científica Eng. Paulo de Frontin. Convênio UFC – SCSP/PMF. **Relatório de Modelagem no Apoio à Decisão no Planejamento, Operação e Gestão dos Sistemas de Transporte Público e de Circulação Viária de Fortaleza**. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- BAILEY, T.C.; GATRELL; A.C. **Interactive Spatial Data Analysis**. Prentice Hall, Harlow, England, 1995.
- CHEN, C. et al. Detecting errors and imputing missing data for single-loop surveillance systems. **Transportation Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, DC, v. 1855, p. 160–167, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/1855-20>. Acesso em: 27 jun. 2022.
- CHI, G.; ZHENG, Y. Estimating transport footprint along highways at local levels: a combination of network analysis and kriging methods. **International Journal of Sustainable Transportation**, Philadelphia, PA, v. 7, 261–273, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15568318.2013.710150>. Acesso em: 10 nov. 2022.
- CLAROS, B.; SUN, C; EDARA P. Safety effectiveness and crash cost benefit of red light cameras in Missouri. **Traffic Injury Prevention**, Columbia , Missouri, v. 18, p. 70–76. 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27348043/>. Acesso em: 17 set. 2023.
- CONTINI, L.; EL-BASYOUNY, K. Lesson learned from the application of intersection safety devices in Edmonton. **Accident Analysis & Prevention**, Oxford, v. 94, p. 127-134, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.05.023>. Acesso em: 12 dez. 2023.
- CRESSIE, N. A. C. **Statistics for spatial data**. Iowa: John Wiley & Sons Inc, 1993.
- CHRISTIE, S.M.; LYONS, R.A.; DUNSTAN, F.D.; JONES, S.J. Are mobile speed cameras effective? A controlled before and after study. **Injury Prevention**, Wales, UK, v. 9, p. 302–306, 2003. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14693888/>. Acesso em: 24 ago. 2022.

- CUNTO, F. J. C.; NODARI, C. T.; BARBOSA, H. M. Transferência de modelos de previsão de acidentes entre cidades brasileiras. **TRANSPORTES**, [S.l], v. 23, p. 76–85, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/transportes.v22i3.790>. Acesso em: 08 fev. 2023.
- DAVIS, G. A. Accuracy of estimates of mean daily traffic: a review. **Transportation Research Record**, n. 1593. Washington, D.C.: National Research Council, p. 12–16, 1997.
- DEMPSTER, A. P.; LAIRD, N.; RUBIN, D. B. Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)**, Oxford, v. 39, p. 1-38, 1977. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/2984875>. Acesso em: 15 oct. 2022.
- DOS SANTOS, E. B. **Impacto dos controladores eletrônicos de velocidade na redução do número e da gravidade de acidentes de trânsito com vítimas em trechos de rodovias federais**. Brasília, DF: Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2019. 101 p.
- ELVIK, R. Effects on Accidents of Automatic Speed Enforcement in Norway. In: ELVIK, R. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., v. 1595, pp. 14–19, 1997. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.3141/1595-03>. Acesso em: 15 oct. 2022.
- ELVIK, R. Developing an Accident Modification Function for Speed Enforcement. **Safety Science**, Washington, D.C., v. 49, n. 6, p. 920–925, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925753511000695>. Acesso em: 11 dez. 2022.
- ELVIK, R.; ULSTEIN, H.; WIFSTAD, K.; SYRSTAD, R.S.; SEEBERG, A.R.; GULBRANDSEN, M. U.; WELDE, M. An empirical Bayes before-after evaluation of road safety effects of a new motorway in Norway. **Accident Analysis & Prevention**, Oxford, v. 108, p. 115-123, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.09.014>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- EOM, J. K.; PARK, M. S.; HEO, T. Y.; HUNTSINGER, L. F. Improving the prediction of annual average daily traffic for non freeway facilities by applying a spatial statistical method. **Transportation research record**, Washington, D.C, v. 1968, p. 20-29, 2006. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0361198106196800103>. Acesso em: 11 dez. 2022.
- ERHUNMWUNSEE, P. O. Estimating Average Annual Daily Traffic Flow from Short Period Counts. **ITE Journal**, Washington, v. 61, p. 23-30, 1991. Disponível em: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1966/118/118-005.pdf>. Acesso em: 15 oct. 2022.
- FARHAN, J.; FWA, T. Airport pavement missing data management and imputation with stochastic multiple imputation model. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, D.C, v. 2336, p. 43–54, 2013. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2336-06>. Acesso em: 11 dez. 2022.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Traffic Monitoring Guide**. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, 2001.
- GAINS, A.; HEYDECKER, B.; SHREWSBURY, J.; ROBERTSON, S. **The National Safety Camera Programme: 3-Year Evaluation Report**. London: PA Consulting Group and University College London for the Department for Transport, 2004.
- GELMAN, A.; CARLIN, J. B.; Stern, H. S.; DUNSON, D. B.; VEHTARI, A.; RUBIN, D. B. **Bayesian Data Analysis**. 3rd ed. London: CRC Press, 2013.

- GOLDENBELD, C.; I.V. SCHAGEN. The Effects of Speed Enforcement with Mobile Radar on Speed and Accidents: An Evaluation Study on Rural Roads in the Dutch Province Friesland. **Accident Analysis and Prevention**, Oxford, v. 37, n. 6, p. 1135–1144. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.06.011>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- HAUER, E. **Observational Before–After Studies in Road Safety**. Oxford: Pergamon Press, 1997.
- HAUER, E. **Observational before-after studies in road safety: estimating the effect of highway and traffic engineering measures on road safety**. 1. ed. Tarrytown, NY, 2002.
- HILBE, J. M. **Modeling Count Data**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139236065>. Acesso em: 20 maio 2023.
- HOLLANDER, Y.; LIU, R. The principles of calibrating traffic microsimulation models. **Transportation**, Leeds, UK, v. 35, p. 347–362, 2008. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11116-007-9156-2>. Acesso em: 17 jun. 2022.
- HOYE, A. Speed cameras, section control, and kangaroo jumps? **Accident Analysis & Prevention**, Oxford, v. 73, p. 200–208, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001457514002577>. Acesso em: 20 maio 2023.
- HUGHES, R. G; COUNCIL. **On Establishing the Relationship(s) between Freeway Safety and Peak Period Operations: Performance Measurement and Methodological Considerations**. Washington DC, 1999, Transportation Research Board. The 78th Annual Meeting.
- LI, H.; GRAHAM, D. J; MAJUMDAR, A. The impacts of speed cameras on road accidents: An application of propensity score matching methods. **Accident Analysis & Prevention**, Oxford, v. 60, p. 148–157, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S000145751300314X>. Acesso em: 20 maio 2023.
- LI, H.; ZHANG, Y.; REN, G. A causal analysis of time-varying speed camera safety effects based on the propensity score method. **Journal of Safety Research**, UK, v. 75, p. 119–127, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2020.08.007>. Acesso em: 11 ago 2023.
- LI, L.; LI, Y.; LI, Z. Efficient missing data imputing for traffic flow by considering temporal and spatial dependence. **Transportation research part C: emerging technologies**, [S.l.], v. 34, p. 108–120, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.05.008>. Acesso em: 14 ago. 2023.
- LLAU, A. F.; AHMED, N. U.; KHAN, H. M. R. U.; CEVALLOS, F. G.; PEKOVIC, V. **The impact of red light cameras on crashes within Miami–Dade County, Florida**. Miami: Florida International University, 2015.
- LORD, D.; GEEDIPALLY, S. R. **Safety Effects of the Red-Light Camera Enforcement Program in Chicago, Illinois**. College Station, TX: Texas A&M University, 2014.
- LV, Y. *et al.* Traffic flow prediction with big data: A deep learning approach. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, [S.l.], v. 16, n. 2, p. 865–873, 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6894591>. Acesso em: 10 jul. 2022.

KEALL, M.D.; L.J. POVEY; W.J. FRITH. The Relative Effectiveness of a Hidden Versus a Visible Speed Camera Programme. **Accident Analysis and Prevention**, Oxford, v. 33, n. 2, p. 277–284. 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(00\)00042-7](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(00)00042-7). Acesso em: 24 ago. 2023.

KIM, S.; PARK, D.; HEO, T.-Y.; KIM, H.; HONG, D. Estimating vehicle miles traveled (VMT) in urban areas using regression kriging. **Journal of Advanced Transportation**, [S.l.], v. 50, p. 769–785, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002%2Fatr.1374>. Acesso em: 15 jul. 2022.

MAHMASSANI, H. S.; SCHOFER, J. L.; JOHNSON, B. L.; VERBAS, O.; ELFAR, A.; MITTAL, A.; OSTOJIC, M. **Chicago Red Light Enforcement: Best Practices and Program Road Map**. Evanston: Northwestern University, The Transportation Center, 2017.

MARQUES, S. de F.; PITOMBO, C. S. Intersecting Geostatistics with Transport Demand Modeling: a Bibliographic Survey. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 72, p. 1028–1050, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/rbcv72nespecial50anos-56467>. Acesso em: 20 ago. 2022.

MARQUES, S. de F.; PITOMBO, C. S. Transit Ridership Modeling at the Bus Stop Level: Comparison of Approaches Focusing on Count and Spatially Dependent Data. **Applied Spatial Analysis and Policy**, [S.l.], v. 16, p. 277–313, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12061-022-09482-y>. Acesso em: 04 jan. 2023.

MARQUES, S. de F.; PITOMBO, C. Should we account for network distances or anisotropy in the spatial estimation of missing traffic data? **TRANSPORTES**, [S.l.], v. 31, p. 1-29. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.58922/transportes.v31i1.2822>. Acesso em: 02 mar. 2023.

MARQUES, S. de F.; PITOMBO, C. S. Applying multivariate Geostatistics for transit ridership modeling at the bus stop level. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [S.l.], v. 27, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1982-2170-2020-0069>. Acesso em: 06 abr. 2023.

MATHERON, G. **The Theory of Regionalized Variables and Its Applications**. Paris: Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, 1971.

MATHEW, S.; PULUGURTHA, S. S. Comparative Assessment of Geospatial and Statistical Methods to Estimate Local Road Annual Average Daily Traffic. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, [S.l.], v. 147, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.00005>. Acesso em: 05 set. 2022.

NUNES, P.B.S; CUNTO, F.J.C; MARQUES, S.F. **Estimação do volume de tráfego em interseções de Fortaleza com base na krigagem universal**. 2023, Santos. Anais eletrônicos. Galoá, 2023. Disponível em: <https://proceedings.science/anpet/anpet-2023/trabalhos/estimacao-do-volume-de-trafego-em-intersecoes-de-fortaleza-com-base-na-krigagem?lang=pt-br>. Acesso em: 15 out. 2022.

OLEA, R. A. A six-step practical approach to semivariogram modeling. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, [S.l.], v. 20, p. 307–318. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00477-005-0026-1>. Acesso em: 11 jul. 2023.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Global status report on road safety 2023**. Genebra: OMS, 2023. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241565684>. Acesso em: 16 jan 2023.

PAUW, E.; DANIELS, S.; BRIJS, T.; HERMANS, E. e WETS, G. To brake or to accelerate? Safety effects of combined speed and red light cameras. **Journal of Safety Research**, Belgium, v. 50, p. 59-65. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2014.03.011>. Acesso em: 16 mar. 2023.

PENÃ, C. C. **Caracterização e Análise dos acidentes em interseções:** Estudo de caso em Rodovias de Santa Catarina. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2011.

PULUGURTHA, S. S.; KUSAM P. R. Modeling Annual Average Daily Traffic with Integrated Spatial Data from Multiple Network Buffer Bandwidths. **Transportation Research Record**, Washington, v. 2291, p. 53–60, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2291-07>. Acesso em: 15 jul. 2024.

R CORE TEAM. **R:** A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2021. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 10 maio 2024.

RAMSEY, G. R. S. Projecting Annual Traffic Volumes from Peak Hour Volumes. **ITE Journal**, Washington, p. 30-33, 1996.

RETTING, R. A.; S. Y. KYRYCHENKO. Reductions in Injury Crashes Associated with Red Light Camera Enforcement in Oxnard, California. **American Journal of Public Health**, Washington, v. 92, n. 11, 2002, p. 1822–1825. Disponível em: <https://doi.org/10.2105/ajph.92.11.1822>. Acesso em: 15 jul. 2024.

REYAD, P.; SACCHI, E.; IBRAHIM, S.; SAYED, T. Traffic Conflict-Based Before–After Study with Use of Comparison Groups and the Empirical Bayes Method. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, v. 2659, p. 15–24, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2659-02>. Acesso em: 25 mai. 2024.

RIBEIRO Jr., P. J.; DIGGLE, P. **geoR:** Analysis of Geostatistical Data. 2016. R package version 1.7-5.2. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=geoR>. Acesso em: 15 jan. 2024.

ROSS, J.; SPERLEY, M. **Red Light Running Camera Assessment.** Oregon: Oregon Department of Transportation, 2011.

PERSAUD B.; LYON, C. Empirical Bayes before–after safety studies: Lessons learned from two decades of experience and future directions. **Accident Analysis & Prevention**, Oxford, v. 39, p. 548–558, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.09.009>. Acesso em: 05 set. 2023.

SACCHI, E.; PERSAUD, B.; BASSANI, M. **Assessing International Transferability of the Highway Safety Manual Crash Prediction Algorithm and its Components.** In: Proceedings of the 91st Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington DC, 2012, Transportation Research Board of the National Academies, .p. 1-9.

SARLAS, G.; AXHAUSEN, K. W. **Prediction of AADT on a nationwide network based on an accessibility weighted centrality measure.** Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung, 1094. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000102909>. Acesso em: 17 nov. 2023.

- SCHAFER, J. L. **Analysis of Incomplete Multivariate Data.** London: Chapman & Hall, 1997.
- SELBY, B.; KOCKELMAN, K. M. Spatial prediction of traffic levels in unmeasured locations: applications of universal kriging and geographically weighted regression. **Journal of Transport Geography**, [S.l], v. 29, p. 24-32, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.12.009>. Acesso em: 17 nov. 2023.
- SMITH, B.; BABICEANU, S. Investigation of extraction, transformation, and loading techniques for traffic data warehouses. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, v. 1879, p. 9–16, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/1879-02>. Acesso em: 24 nov. 2023.
- SMITH, B.; CONKLIN, J. Use of local lane distribution patterns to estimate missing data values from traffic monitoring systems. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, v. 1811, p. 50–56, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/1811-06>. Acesso em: 14 nov. 2023.
- SOBREIRA, L.T.P. **Regimes de Fluxo Veicular e Acidentes de Trânsito em Interseções Semaforizadas de Fortaleza.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- SONG, I.; KIM, D. Three Common Machine Learning Algorithms Neither Enhance Prediction Accuracy Nor Reduce Spatial Autocorrelation in Residuals: An Analysis of Twenty-five Socioeconomic Data Sets. **Geographical Analysis**, [S.l], v. 55, p. 585-620, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gean.12351>. Acesso em: 08 jan. 2024.
- SONG, Y.; WANG, X.; WRIGHT, G.; THATCHER, D.; WU, P.; FELIX, P. Traffic Volume Prediction With Segment-Based Regression Kriging and its Implementation in Assessing the Impact of Heavy Vehicles. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, [S.l], v. 20, p. 232–243, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8307463>. Acesso em: 12 fev. 2024.
- SU, H.; ZHANG L.; YU, S. **Short-term Traffic Flow Prediction Based on Incremental Support Vector Regression.** Haikou, 2007, p. 640-645. Third International Conference on Natural Computation (ICNC).
- TAY, R. The effectiveness of enforcement and publicity campaigns on serious crashes involving young male drivers: Are drink driving and speeding similar? **Accident Analysis & Prevention**, Oxford, v. 32, n. 1, p. 217-225, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.04.010>. Acesso em: 06 ago. 2023.
- TOBLER, W. R. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. **Economic Geography**, [S.l] v. 46, p. 234–240, 1970. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/143141>. Acesso em: 06 ago. 2023.
- TORRES, C. A. **Avaliação do desempenho da segurança viária em redes urbanas de transportes com utilização de modelos de previsão de acidentes.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologias, Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2016.

- VANLAAR, W.; ROBERTSON, R.; MARCOUX, K. **An Evaluation of Winnipeg's Photo Enforcement Safety Program: Results of Time Series Analyses and an Intersection Camera Experiment: Final Report.** Ottawa: Traffic Injury Research Foundation, 2014.
- VADEBY, A; FORSMAN, A. Traffic safety effects of new speed limits in Sweden. **Accidents Analysis and Prevention**, Oxford, v. 114, p. 34-39. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.02.003>. Acesso em: 10 mai. 2023.
- WALDEN, T. D.; GEEDIPALLY, M.; KO, R.; GILBERT, M.; PEREZ, M. **Evaluation of Automated Traffic Enforcement Systems in Texas.** Austin: Texas Department of Transportation, Traffic Operations Division, 2011. Disponível em: [http://ftp.dot.state.tx.us/pub/txdot-info/trf/red\\_light/auto\\_traffic.pdf](http://ftp.dot.state.tx.us/pub/txdot-info/trf/red_light/auto_traffic.pdf). Acesso em: 5 set. 2023.
- WRIGHT, T.; HU, P.; YOUNG, J.; LU, A. **Variability in Traffic Monitoring Data.** Knoxville, TN: Oak Ridge National Laboratory for the U.S. Department of Energy, University of Tennessee, 1997.
- YAN, X.; SU, X. G. **Linear regression analysis: theory and computing.** Singapore: World Scientific, 2009.
- YANG, H.; YANG, J.; HAN L. D.; LIU, X.; PU, L.; CHIN, S.M.; HWANG, H.-L. A Kriging based spatiotemporal approach for traffic volume data imputation. **PloS one**, [S.I], v. 13, e0195957, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195957>. Acesso em: 10 mai. 2024.
- ZAHEDIAN, S.; SEKULA, P.; NOHEKHAN, A.; VANDER LAAN, Z. Estimating Hourly Traffic Volumes using Artificial Neural Network with Additional Inputs from Automatic Traffic Recorders. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, v. 2674, p. 272-282, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0361198120910737>. Acesso em: 19 mai. 2023.
- ZHANG, Y.; LIU, Y. Missing traffic flow data prediction using least squares support vector machines in urban arterial streets. **Transportation Research Record**. Washington, D.C.: National Research Council, 2008.
- ZHONG, M.; SHARMA, S.; LINGRAS, P. Genetically designed models for accurate imputation of missing traffic counts. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, v. 1879, p. 71–79, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/1879-09>. Acesso em: 10 mai. 2024.
- ZHOU, M.; SISIOPIKU, V. Relationship between volume-to-capacity ratios and accident rates. **Transportation Research Record**. Washington, D.C.: National Research Council, p. 47–52, 1997.

**ANEXO A – TABELA COM INTERSEÇÕES ESCOLHIDAS, DATA DE  
INSTALAÇÃO E DESINSTALAÇÃO DFE, SINISTROS ANTES E DEPOIS, E  
NÚMERO DE FAIXAS**

Tabela A.1 – Interseções escolhidas, data de instalação e desinstalação DFE, Sinistros Antes e Depois e Número de Faixas.

ID	CRUZAMENTO	DAT_INIC_EST	DAT_FIN_EST	IMPLANT_FE	DESAT_FE	#MESES ANT	#MESES DEPOIS	#SINIS TOT ANT	#SINIS FER ANT	#SINIS TOT DEPOIS	#SINIS FER DEPOIS	#FAIXAS
1	SILAS MUNGUBA X BERNARDO MANOEL	01/01/2010	31/12/2019	11/02/2014	-	49	70	79	18	85	48	20
2	SILAS MUNGUBA X GERMANO FRANCK	01/01/2010	31/12/2019	11/02/2014	12/06/2019	49	64	83	15	41	16	13
3	CARNEIRO DE MENDONÇA X LINEU MACHADO	01/01/2010	31/12/2019	13/06/2014	18/05/2016	53	23	24	4	11	1	8
4	THOMAZ COELHO X CASTELO DE CASTRO	01/01/2010	31/12/2019	30/06/2014	-	53	66	39	9	17	7	24
5	GODOFREDO MACIEL X GERMANO FRANCK	01/01/2010	31/12/2019	22/07/2014	-	54	65	8	4	11	8	12
6	MOREIRA DA ROCHA X RUI BARBOSA	01/01/2010	31/12/2019	29/07/2014	-	54	65	41	16	6	2	8
7	EDUARDO GIRÃO X SILVA JUNIOR	01/01/2010	31/12/2019	30/07/2014	-	54	65	39	9	18	5	12
8	JULIO ABREU X OITO DE SETEMBRO	01/01/2010	31/12/2019	16/10/2014	-	57	62	5	0	5	2	12
9	SANTOS DUMONT X ALMEIDA PRADO	01/01/2010	31/12/2019	28/10/2014	25/01/2019	57	50	13	2	10	3	12
10	COSTA E SILVA X CEL TIBURCIO	01/01/2010	31/12/2019	11/11/2014	-	58	61	49	12	20	12	16
11	AUGUSTO DOS ANJOS X JULIO BRAGA	01/01/2010	31/12/2019	13/11/2014	-	58	61	29	13	23	14	12
12	GUILHERME ROCHA X PADRE MORORO	01/01/2010	31/12/2019	26/11/2014	-	58	61	12	2	8	4	8
13	JOSE BASTOS X DELMIRO DE FARIAS	01/01/2010	31/12/2019	09/12/2014	-	59	60	28	10	9	5	16
14	13 DE MAIO X UNIVERSIDADE	01/01/2010	31/12/2019	27/01/2015	-	60	59	88	14	39	11	17
15	PONTES VIEIRA X VICENTE LEITE	01/01/2010	31/12/2019	28/01/2015	26/03/2018	60	37	19	7	9	4	10
16	GODOFREDO MACIEL X ANT BANDEIRA	01/01/2010	31/12/2019	04/02/2015	-	61	58	24	12	17	6	14
17	DOM LUIS X VIRGILIO TAVORA	01/01/2010	31/12/2019	23/09/2014	-	56	63	46	10	40	12	16
18	JOVITA FEITOSA X HUMBE MONTE	01/01/2010	31/12/2019	28/05/2015	-	64	55	39	16	22	13	20
19	BEZERRA BEZERRA DE MENEZES X RUA RIBEIRO DA SILVA)	01/01/2010	31/12/2019	03/08/2015	-	67	52	25	10	5	1	20
20	RAUL BARBOSA X RUA MAJOR ARAÚJO AGUIAR	01/01/2010	31/12/2019	13/08/2015	20/12/2019	67	52	2	0	10	6	16
21	VERBENA X VITAL BRASIL BRASIL	01/01/2010	31/12/2019	05/11/2015	-	70	49	28	8	10	7	8
22	SANTOS DUMONT X DESEMBARGADOR MOREIRA	01/01/2010	31/12/2019	18/08/2014	17/06/2019	55	57	45	10	37	15	16
23	EDUARDO GIRÃO X JÚLIO CÉSAR	01/01/2010	31/12/2019	15/12/2015	-	71	48	37	10	8	4	12
24	EDUARDO GIRÃO X DAMASC GIRÃO	01/01/2010	31/12/2019	21/03/2016	-	74	45	21	3	1	1	12
25	RAIMUNDO GIRÃO X RUI BARBOSA	01/01/2010	31/12/2019	24/04/2014	-	51	68	31	5	22	7	10
26	CEL CARVALHO X RUA HERMES P PARAHYBA	01/01/2010	31/12/2019	29/03/2016	-	74	45	35	13	10	5	14
27	EDUARDO GIRÃO X AV. DOS EX EXPEDICIONÁRIOS	01/01/2010	31/12/2019	03/05/2016	-	76	43	91	26	25	15	16
28	ANSELMO NOGUEIRA X RUA EMÍ MENEZES	01/01/2010	31/12/2019	04/05/2016	-	76	43	50	25	8	6	8
29	RAIMUNDO GIRÃO X ILDEFONSO ALBANO	01/01/2010	31/12/2019	03/06/2014	-	53	66	34	9	16	4	11
30	ISAC AMARAL X JOAQUIM NABUCO	01/01/2010	31/12/2019	22/06/2016	27/07/2018	77	25	11	6	1	0	8
31	EDUARDO GIRÃO X LUCIANO CARNEIRO	01/01/2010	31/12/2019	22/06/2016	-	77	42	69	21	24	12	16
32	AV. ABOLIÇÃO, 2687 X AV DES. MOREIRA	01/01/2010	31/12/2019	25/09/2016	-	80	39	111	16	42	11	13
33	DEP PAULINO ROCHA X P GOMES	01/01/2010	31/12/2019	08/12/2016	19/05/2017	83	5	57	8	3	1	13
34	PONTES VIEIRA X AV VIRGÍLIO TAVORA	01/01/2010	31/12/2019	13/12/2016	-	83	36	32	8	6	4	12
35	PRESIDENTE COSTA E SILVA X CIDADE JARDIM	01/01/2010	31/12/2019	14/02/2017	-	85	34	57	20	13	4	16
36	TORRES CÂMARA X TIBÚRCI CAVALCANTE	01/01/2010	31/12/2019	22/03/2017	-	86	33	24	9	6	2	8

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela A.2 – VDMA por ano

ID	CRUZAMENTO	#FAIXAS	VDMA 2010	VMDA 2011	VMDA 2012	VMDA 2013	VMDA 2014	VMDA 2015	VMDA 2016	VMDA 2017	VMDA 2018	VMDA 2019
1	SILAS MUNGUBA X BERNARDO MANOEL	20	44903	42978	45106	34701	37580	37466	33730	32534	46205	49506
2	SILAS MUNGUBA X GERMANO FRANCK	13	32859	46869	52430	44755	42207	41495	38884	35929	47768	54369
3	CARNEIRO DE MENDONÇA X LINEU MACHADO	8	36609	40722	42157	40384	37891	38558	32468	34269	43259	42284
4	THOMAZ COELHO X CASTELO DE CASTRO	24	44646	52413	56592	52323	44846	43086	41467	37082	48960	59071
5	GODOFREDO MACIEL X GERMANO FRANCK	12	32851	42359	45944	38132	38105	38218	34371	33267	45679	45739
6	MOREIRA DA ROCHA X RUI BARBOSA	8	31163	32279	28355	27460	26212	27819	27136	21069	39024	30620
7	EDUARDO GIRÃO X SILVA JUNIOR	12	39391	41441	44596	34927	37412	37188	36149	32627	46255	37280
8	JULIO ABREU X OITO DE SETEMBRO	12	38618	41973	42457	26962	32062	36230	34557	29861	41545	29890
9	SANTOS DUMONT X ALMEIDA PRADO	12	40305	43554	48389	24402	34835	39218	39331	33966	43939	37533
10	COSTA E SILVA X CEL TIBURCIO	16	41975	50296	49260	53662	37285	38553	37626	32795	52465	41562
11	AUGUSTO DOS ANJOS X JULIO BRAGA	12	39630	44694	45136	35955	35270	37507	35050	32302	42979	36800
12	GUILHERME ROCHA X PADRE MORORO	8	36884	38848	35101	33695	31472	32803	28131	31172	47457	37744
13	JOSE BASTOS X DELMIRO DE FARIA	16	39704	44948	48403	42031	39779	38573	35428	34454	53887	51931
14	13 DE MAIO X UNIVERSIDADE	17	42317	43254	46521	51263	43098	34890	30396	34678	55501	50545
15	PONTES VIEIRA X VICENTE LEITE	10	38128	42752	41529	27153	35481	35095	34390	29422	46791	34810
16	GODOFREDO MACIEL X ANT BANDEIRA	14	36989	45415	48870	42101	39982	39541	36307	34300	46642	49452
17	DOM LUIS X VIRGILIO TAVORA	16	37571	46020	49496	49287	39534	40401	37566	32232	42947	47762
18	JOVITA FEITOSA X HUMBE MONTE	20	41147	50558	53089	50855	41481	40787	38216	35353	47698	53625
19	BEZERRA BEZERRA DE MENEZES X RUA RIBEIRO DA SILVA)	20	40796	50990	47070	43711	31627	36234	35591	33807	52281	44490
20	RAUL BARBOSA X RUA MAJOR ARAÚJO AGUIAR	16	42913	47434	48869	44223	41978	39351	36483	33995	47187	49456
21	VERBENA X VITAL BRASIL BRASIL	8	37992	40352	41301	35266	35389	35827	31151	31298	47118	39196
22	SANTOS DUMONT X DESEMBARGADOR MOREIRA	16	46085	42889	46857	47019	38934	40130	36967	29966	37576	48428
23	EDUARDO GIRÃO X JÚLIO CÉSAR	12	40271	37506	45729	38860	40842	36562	32481	33735	50851	46374
24	EDUARDO GIRÃO X DAMASC GIRÃO	12	40353	38680	45788	39560	41075	37011	33078	33863	50581	46056
25	RAIMUNDO GIRÃO X RUI BARBOSA	10	36964	39073	36207	39739	36769	33906	29933	26439	42868	43140
26	CEL CARVALHO X RUA HERMES P PARAHYBA	14	39710	43330	45221	39313	37597	37559	33884	32500	46154	43725
27	EDUARDO GIRÃO X AV. DOS EX EXPEDICIONÁRIOS	16	41848	42624	49403	44364	43663	39378	36450	35635	50895	50635
28	ANSELMO NOGUEIRA X RUA EMÍ MENEZES	8	37960	40386	41302	35293	35378	35821	31150	31291	46700	39199
29	RAIMUNDO GIRÃO X ILDEFONSO ALBANO	11	32713	37209	36215	39056	35157	34135	29734	27668	44382	42897
30	ISAC AMARAL X JOAQUIM NABUCO	8	36965	40457	37863	21248	32389	33495	34782	28637	43740	32112
31	EDUARDO GIRÃO X LUCIANO CARNEIRO	16	41021	42872	48652	44147	43462	39849	37495	35845	49520	50136
32	AV. ABOLIÇÃO, 2687 X AV DES. MOREIRA	13	39334	49155	46003	46262	41822	40970	36723	31990	42594	49864
33	DEP PAULINO ROCHA X P GOMES	13	39757	43537	43669	31992	33678	35725	33758	30495	48658	34314
34	PONTES VIEIRA X AV VIRGÍLIO TÁVORA	12	36611	41434	43507	36689	40420	37078	34255	31513	50342	44614
35	PRESIDENTE COSTA E SILVA X CIDADE JARDIM	16	40401	45056	45469	34659	34871	36666	35047	31260	45013	36781
36	TORRES CÂMARA X TIBÚRCI CAVALCANTE	8	33008	30294	32532	33942	32676	36213	33336	27665	37297	38748

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela A.3 – Sinistros observados e meses do período “antes”

ID	CRUZAMENTO	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16	K17	K18	K19	$\Sigma K$	M2010	M2011	M2012	M2013	M2014	M2015	M2016	M2017	M2018	M2019	MÊS ANTES
1	SILAS MUNGUBA X BERNARDO MANOEL	4	4	6	4	0	0	0	0	0	0	18	12	12	12	12	1	0	0	0	0	0	49
2	SILAS MUNGUBA X GERMANO FRANCK	1	2	3	7	0	0	0	0	0	0	13	12	12	12	12	1	0	0	0	0	0	49
3	CARNEIRO DE MENDONÇA X LINEU MACHADO	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	4	12	12	12	12	5	0	0	0	0	0	53
4	THOMAZ COELHO X CASTELO DE CASTRO	4	2	3	1	0	0	0	0	0	0	10	12	12	12	12	6	0	0	0	0	0	54
5	GODOFREDO MACIEL X GERMANO FRANCK	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	4	12	12	12	12	6	0	0	0	0	0	54
6	MOREIRA DA ROCHA X RUI BARBOSA	4	4	7	1	1	0	0	0	0	0	17	12	12	12	12	6	0	0	0	0	0	54
7	EDUARDO GIRÃO X SILVA JUNIOR	4	1	2	3	0	0	0	0	0	0	10	12	12	12	12	6	0	0	0	0	0	54
8	JULIO ABREU X OITO DE SETEMBRO	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	5	12	12	12	12	9	0	0	0	0	0	57
9	SANTOS DUMONT X ALMEIDA PRADO	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	12	12	12	12	9	0	0	0	0	0	57
10	COSTA E SILVA X CEL TIBURCIO	4	2	5	2	2	0	0	0	0	0	15	12	12	12	12	10	0	0	0	0	0	58
11	AUGUSTO DOS ANJOS X JULIO BRAGA	7	10	7	3	2	0	0	0	0	0	29	12	12	12	12	10	0	0	0	0	0	58
12	GUILHERME ROCHA X PADRE MORORO	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	12	12	12	12	10	0	0	0	0	0	58
13	JOSE BASTOS X DELMIRO DE FARIAS	3	3	2	0	2	0	0	0	0	0	10	12	12	12	12	11	0	0	0	0	0	59
14	13 DE MAIO X UNIVERSIDADE	4	1	7	1	1	0	0	0	0	0	14	12	12	12	12	12	0	0	0	0	0	60
15	PONTES VIEIRA X VICENTE LEITE	2	1	0	3	1	0	0	0	0	0	7	12	12	12	12	12	0	0	0	0	0	60
16	GODOFREDO MACIEL X ANT BANDEIRA	3	4	3	1	1	0	0	0	0	0	12	12	12	12	12	12	1	0	0	0	0	61
17	DOM LUIS X VIRGILIO TAVORA	3	1	2	2	2	0	0	0	0	0	10	12	12	12	12	8	0	0	0	0	0	56
18	JOVITA FEITOSA X HUMBE MONTE	1	3	2	3	4	3	0	0	0	0	16	12	12	12	12	12	4	0	0	0	0	64
19	BEZERRA BEZERRA DE MENEZES X RUA RIBEIRO DA SILVA)	7	0	0	1	1	1	0	0	0	0	10	12	12	12	12	12	7	0	0	0	0	67
20	RAUL BARBOSA X RUA MAJOR ARAÚJO AGUIAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	12	12	12	12	7	0	0	0	0	67
21	VERBENA X VITAL BRASIL BRASIL	0	4	2	0	1	3	0	0	0	0	10	12	12	12	12	12	10	0	0	0	0	70
22	SANTOS DUMONT X DESEMBARGADOR MOREIRA	4	1	1	4	0	0	0	0	0	0	10	12	12	12	12	7	0	0	0	0	0	55
23	EDUARDO GIRÃO X JÚLIO CÉSAR	6	0	1	0	0	3	0	0	0	0	10	12	12	12	12	12	11	0	0	0	0	71
24	EDUARDO GIRÃO X DAMASC GIRÃO	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	3	12	12	12	12	12	12	2	0	0	0	74
25	RAIMUNDO GIRÃO X RUI BARBOSA	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0	5	12	12	12	12	3	0	0	0	0	0	51
26	CEL CARVALHO X RUA HERMES P PARAHYBA	3	3	2	1	0	2	2	0	0	0	13	12	12	12	12	12	12	2	0	0	0	74
27	EDUARDO GIRÃO X AV. DOS EX EXPEDICIONÁRIOS	4	8	6	3	1	4	0	0	0	0	26	12	12	12	12	12	12	4	0	0	0	76
28	ANSELMO NOGUEIRA X RUA EMÍ MENEZES	2	4	6	4	6	4	0	0	0	0	26	12	12	12	12	12	12	4	0	0	0	76
29	RAIMUNDO GIRÃO X ILDEFONSO ALBANO	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	5	12	12	12	12	12	12	5	0	0	0	77
30	ISAC AMARAL X JOAQUIM NABUCO	0	2	0	0	2	2	0	0	0	0	6	12	12	12	12	12	12	5	0	0	0	77
31	EDUARDO GIRÃO X LUCIANO CARNEIRO	3	3	4	5	0	5	1	0	0	0	21	12	12	12	12	12	12	5	0	0	0	77
32	AV. ABOLIÇÃO, 2687 X AV DES. MOREIRA	4	2	4	1	2	1	2	0	0	0	16	12	12	12	12	12	12	8	0	0	0	80
33	DEP PAULINO ROCHA X P GOMES	1	0	1	1	0	2	4	0	0	0	9	12	12	12	12	12	12	11	0	0	0	83
34	PONTES VIEIRA X AV VIRGÍLIO TÁVORA	1	1	1	2	0	1	2	0	0	0	8	12	12	12	12	12	12	11	0	0	0	83
35	PRESIDENTE COSTA E SILVA X CIDADE JARDIM	1	1	8	4	4	2	3	0	0	0	23	12	12	12	12	12	12	12	1	0	0	85
36	TORRES CÂMARA X TIBÚRCI CAVALCANTE	1	0	0	1	1	1	5	0	0	0	9	12	12	12	12	12	12	12	2	0	0	86

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela A.4 – Sinistros previstos e parâmetros do método 4 etapas.

ID	CRUZAMENTO	E(k) - 2010	E(k) - 2011	E(k) - 2012	E(k) - 2013	E(k) - 2014	E(k) - 2015	E(k) - 2016	E(k) - 2017	E(k) - 2018	E(k) - 2019	E(k) - antes	Var(k)	$\alpha$ (MEB)	E(k/K)	Var(k)
1	SILAS MUNGUBA X BERNARDO MANOEL	3,462	2,959	3,726	2,129	0,129	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	12,4	13,760	0,474	15	8
2	SILAS MUNGUBA X GERMANO FRANCK	2,569	3,214	4,303	2,715	0,144	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	12,9	14,983	0,464	13	7
3	CARNEIRO DE MENDONÇA X LINEU MACHADO	2,849	2,810	3,493	2,461	0,648	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	12,3	13,443	0,477	8	4
4	THOMAZ COELHO X CASTELO DE CASTRO	3,443	3,577	4,628	3,152	0,913	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	15,7	22,077	0,416	12	7
5	GODOFREDO MACIEL X GERMANO FRANCK	2,569	2,918	3,793	2,330	0,781	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	12,4	13,728	0,474	8	4
6	MOREIRA DA ROCHA X RUI BARBOSA	2,442	2,251	2,392	1,703	0,546	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	9,3	7,791	0,545	13	6
7	EDUARDO GIRÃO X SILVA JUNIOR	3,055	2,858	3,686	2,143	0,768	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	12,5	13,992	0,472	11	6
8	JULIO ABREU X OITO DE SETEMBRO	2,998	2,893	3,517	1,673	0,994	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	12,1	13,037	0,481	8	4
9	SANTOS DUMONT X ALMEIDA PRADO	3,123	2,997	3,985	1,521	1,076	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	12,7	14,425	0,468	7	4
10	COSTA E SILVA X CEL TIBURCIO	3,246	3,439	4,054	3,229	1,275	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	15,2	20,776	0,423	15	9
11	AUGUSTO DOS ANJOS X JULIO BRAGA	3,073	3,072	3,729	2,203	1,209	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	13,3	15,782	0,457	22	12
12	GUILHERME ROCHA X PADRE MORORO	2,869	2,687	2,933	2,070	1,085	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11,6	12,122	0,490	7	3
13	JOSE BASTOS X DELMIRO DE FARIAS	3,078	3,088	3,986	2,557	1,492	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	14,2	18,036	0,441	12	7
14	13 DE MAIO X UNIVERSIDADE	3,272	2,977	3,838	3,091	1,758	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	14,9	19,946	0,428	14	8
15	PONTES VIEIRA X VICENTE LEITE	2,961	2,944	3,444	1,685	1,460	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	12,5	13,956	0,472	10	5
16	GODOFREDO MACIEL X ANT BANDEIRA	2,877	3,119	4,023	2,561	1,636	0,272	0,000	0,000	0,000	0,000	14,5	18,769	0,436	13	7
17	DOM LUIS X VIRGILIO TAVORA	2,920	3,159	4,072	2,977	1,079	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	14,2	18,048	0,440	12	7
18	JOVITA FEITOSA X HUMBE MONTE	3,185	3,456	4,354	3,068	1,695	1,121	0,000	0,000	0,000	0,000	16,9	25,472	0,399	16	10
19	BEZERRA BEZERRA DE MENEZES X RUA RIBEIRO DA SILVA)	3,159	3,484	3,881	2,655	1,308	1,752	0,000	0,000	0,000	0,000	16,2	23,579	0,408	13	7
20	RAUL BARBOSA X RUA MAJOR ARAÚJO AGUIAR	3,316	3,251	4,023	2,684	1,714	1,896	0,000	0,000	0,000	0,000	16,9	25,490	0,398	7	4
21	VERBENA X VITAL BRASIL BRASIL	2,951	2,786	3,426	2,163	1,456	2,476	0,000	0,000	0,000	0,000	15,3	20,816	0,423	12	7
22	SANTOS DUMONT X DESEMBARGADOR MOREIRA	3,549	2,953	3,865	2,846	0,930	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	14,1	17,887	0,442	12	7
23	EDUARDO GIRÃO X JÚLIO CÉSAR	3,120	2,598	3,776	2,373	1,670	2,777	0,000	0,000	0,000	0,000	16,3	23,795	0,407	13	7
24	EDUARDO GIRÃO X DAMASC GIRÃO	3,126	2,676	3,780	2,413	1,679	3,065	0,538	0,000	0,000	0,000	17,3	26,692	0,393	9	5
25	RAIMUNDO GIRÃO X RUI BARBOSA	2,875	2,702	3,021	2,424	0,378	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11,4	11,618	0,495	8	4
26	CEL CARVALHO X RUA HERMES P PARAHYBA	3,079	2,982	3,736	2,399	1,543	3,109	0,551	0,000	0,000	0,000	17,4	27,063	0,391	15	9
27	EDUARDO GIRÃO X AV. DOS EX EXPEDICIONÁRIOS	3,237	2,936	4,065	2,693	1,780	3,252	1,181	0,000	0,000	0,000	19,1	32,766	0,369	23	15
28	ANSELMO NOGUEIRA X RUA EMÍ MENEZES	2,949	2,788	3,426	2,164	1,456	2,971	1,016	0,000	0,000	0,000	16,8	25,146	0,400	22	13
29	RAIMUNDO GIRÃO X ILDEFONSO ALBANO	2,558	2,578	3,021	2,384	1,447	2,837	1,215	0,000	0,000	0,000	16,0	23,009	0,411	10	6
30	ISAC AMARAL X JOAQUIM NABUCO	2,875	2,793	3,153	1,333	1,338	2,787	1,411	0,000	0,000	0,000	15,7	22,009	0,416	10	6
31	EDUARDO GIRÃO X LUCIANO CARNEIRO	3,176	2,952	4,006	2,680	1,772	3,290	1,516	0,000	0,000	0,000	19,4	33,622	0,366	20	13
32	AV. ABOLIÇÃO, 2687 X AV DES. MOREIRA	3,051	3,364	3,797	2,803	1,708	3,378	2,379	0,000	0,000	0,000	20,5	37,499	0,353	18	11
33	DEP PAULINO ROCHA X P GOMES	3,082	2,996	3,613	1,970	1,389	2,964	3,018	0,000	0,000	0,000	19,0	32,385	0,370	13	8
34	PONTES VIEIRA X AV VIRGÍLIO TÁVORA	2,849	2,857	3,600	2,246	1,653	3,071	3,060	0,000	0,000	0,000	19,3	33,431	0,366	12	8
35	PRESIDENTE COSTA E SILVA X CIDADE JARDIM	3,130	3,095	3,755	2,127	1,436	3,038	3,412	0,201	0,000	0,000	20,2	36,462	0,356	22	14
36	TORRES CÂMARA X TIBÚRCI CAVALCANTE	2,580	2,119	2,727	2,085	1,349	3,002	3,253	0,357	0,000	0,000	17,5	27,297	0,390	12	8

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela A.5 – Sinistros e meses do período “depois”

ID	CRUZAMENTO	λ <sub>10</sub>	λ <sub>11</sub>	λ <sub>12</sub>	λ <sub>13</sub>	λ <sub>14</sub>	λ <sub>15</sub>	λ <sub>16</sub>	λ <sub>17</sub>	λ <sub>18</sub>	λ <sub>19</sub>	Σλ	M2010	M2011	M2012	M2013	M2014	M2015	M2016	M2017	M2018	M2019
1	SILAS MUNGUBA X BERNARDO MANOEL	0	0	0	0	6	18	14	5	3	2	48	0	0	0	0	9	12	12	12	12	12
2	SILAS MUNGUBA X GERMANO FRANCK	0	0	0	0	4	2	4	2	0	2	14	0	0	0	0	9	12	12	12	12	5
3	CARNEIRO DE MENDONÇA X LINEU MACHADO	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	5	12	4	0	0	0
4	THOMAZ COELHO X CASTELO DE CASTRO	0	0	0	0	0	4	0	1	1	1	7	0	0	0	0	4	12	12	12	12	12
5	GODOFREDO MACIEL X GERMANO FRANCK	0	0	0	0	1	1	1	2	0	3	8	0	0	0	0	4	12	12	12	12	12
6	MOREIRA DA ROCHA X RUI BARBOSA	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	0	0	0	0	4	12	12	12	12	12
7	EDUARDO GIRÃO X SILVA JUNIOR	0	0	0	0	0	1	2	0	0	2	5	0	0	0	0	4	12	12	12	12	12
8	JULIO ABREU X OITO DE SETEMBRO	0	0	0	0	0	1	1	3	0	0	5	0	0	0	0	0	12	12	12	12	12
9	SANTOS DUMONT X ALMEIDA PRADO	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	3	0	0	0	0	0	12	12	12	12	0
10	COSTA E SILVA X CEL TIBURCIO	0	0	0	0	0	2	0	5	3	2	12	0	0	0	0	0	12	12	12	12	12
11	AUGUSTO DOS ANJOS X JULIO BRAGA	0	0	0	0	0	3	10	5	4	1	23	0	0	0	0	0	12	12	12	12	12
12	GUILHERME ROCHA X PADRE MORORO	0	0	0	0	0	2	0	1	1	0	4	0	0	0	0	0	12	12	12	12	12
13	JOSE BASTOS X DELMIRO DE FARIAS	0	0	0	0	0	0	0	3	1	1	5	0	0	0	0	0	11	12	12	12	12
14	13 DE MAIO X UNIVERSIDADE	0	0	0	0	0	2	1	2	2	3	10	0	0	0	0	0	10	12	12	12	12
15	PONTES VIEIRA X VICENTE LEITE	0	0	0	0	0	2	1	1	0	0	4	0	0	0	0	0	10	12	12	2	0
16	GODOFREDO MACIEL X ANT BANDEIRA	0	0	0	0	0	0	4	3	0	0	7	0	0	0	0	0	9	12	12	12	12
17	DOM LUIS X VIRGILIO TAVORA	0	0	0	0	0	2	3	4	1	2	12	0	0	0	0	0	2	12	12	12	12
18	JOVITA FEITOSA X HUMBE MONTE	0	0	0	0	0	0	3	2	2	6	13	0	0	0	0	0	6	12	12	12	12
19	BEZERRA BEZERRA DE MENEZES X RUA RIBEIRO DA SILVA)	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	12	12	12
20	RAUL BARBOSA X RUA MAJOR ARAÚJO AGUIAR	0	0	0	0	0	0	3	1	2	0	6	0	0	0	0	0	0	3	12	12	11
21	VERBENA X VITAL BRASIL BRASIL	0	0	0	0	0	0	1	2	1	2	6	0	0	0	0	0	0	12	12	12	12
22	SANTOS DUMONT X DESEMBARGADOR MOREIRA	0	0	0	0	1	5	5	4	0	0	15	0	0	0	0	0	2	12	12	12	5
23	EDUARDO GIRÃO X JÚLIO CÉSAR	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0	4	0	0	0	0	0	0	11	12	12	12
24	EDUARDO GIRÃO X DAMASC GIRÃO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	8	12	12	12
25	RAIMUNDO GIRÃO X RUI BARBOSA	0	0	0	0	0	2	3	0	1	1	7	0	0	0	0	0	7	12	12	12	12
26	CEL CARVALHO X RUA HERMES P PARAHYBA	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	6	0	0	0	0	0	7	12	12	12	12
27	EDUARDO GIRÃO X AV. DOS EX EXPEDICIONÁRIOS	0	0	0	0	0	0	3	3	3	5	14	0	0	0	0	0	0	0	6	12	12
28	ANSELMO NOGUEIRA X RUA EMÍ MENEZES	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	6	0	0	0	0	0	0	0	6	12	12
29	RAIMUNDO GIRÃO X ILDEFONSO ALBANO	0	0	0	0	0	1	4	2	0	1	8	0	0	0	0	0	5	12	12	12	12
30	ISAC AMARAL X JOAQUIM NABUCO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	12	6	0
31	EDUARDO GIRÃO X LUCIANO CARNEIRO	0	0	0	0	0	3	2	1	6	12	0	0	0	0	0	0	0	5	12	12	12
32	AV. ABOLIÇÃO, 2687 X AV DES. MOREIRA	0	0	0	0	0	0	1	4	4	3	12	0	0	0	0	0	0	2	12	12	12
33	DEP PAULINO ROCHA X P GOMES	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
34	PONTES VIEIRA X AV VIRGÍLIO TÁVORA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	11	12
35	PRESIDENTE COSTA E SILVA X CIDADE JARDIM	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0	9	12	12
36	TORRES CÂMARA X TIBÚRCI CAVALCANTE	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	8	12	12

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela A.6 – Sinistros previstos período “depois”

ID	CRUZAMENTO	E{k} - 2010	E{k} - 2011	E{k} - 2012	E{k} - 2013	E{k} - 2014	E{k} - 2015	E{k} - 2016	E{k} - 2017	E{k} - 2018	E{k} - 2019	E{k} - depois	Rc
1	SILAS MUNGUBA X BERNARDO MANOEL	0,000	0,000	0,000	0,000	1,157	3,101	3,290	2,502	2,808	2,984	15,842	1,28
2	SILAS MUNGUBA X GERMANO FRANCK	0,000	0,000	0,000	0,000	1,292	3,419	3,768	2,751	2,899	1,360	15,489	1,20
3	CARNEIRO DE MENDONÇA X LINEU MACHADO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,648	3,188	1,057	0,000	0,000	0,000	4,893	0,40
4	THOMAZ COELHO X CASTELO DE CASTRO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,609	3,544	4,007	2,835	2,968	3,533	17,496	1,11
5	GODOFREDO MACIEL X GERMANO FRANCK	0,000	0,000	0,000	0,000	0,521	3,161	3,349	2,556	2,777	2,767	15,132	1,22
6	MOREIRA DA ROCHA X RUI BARBOSA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,364	2,334	2,672	1,652	2,390	1,886	11,298	1,21
7	EDUARDO GIRÃO X SILVA JUNIOR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,512	3,079	3,515	2,509	2,811	2,276	14,702	1,18
8	JULIO ABREU X OITO DE SETEMBRO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,004	3,367	2,305	2,537	1,843	13,055	1,08
9	SANTOS DUMONT X ALMEIDA PRADO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,240	3,810	2,607	2,676	0,000	12,333	0,97
10	COSTA E SILVA X CEL TIBURCIO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,187	3,652	2,521	3,170	2,525	15,056	0,99
11	AUGUSTO DOS ANJOS X JULIO BRAGA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,105	3,413	2,485	2,620	2,248	13,871	1,04
12	GUILHERME ROCHA X PADRE MORORO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,732	2,766	2,402	2,881	2,303	13,083	1,12
13	JOSE BASTOS X DELMIRO DE FARIAS	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,923	3,448	2,643	3,252	3,124	15,390	1,08
14	13 DE MAIO X UNIVERSIDADE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,414	2,978	2,659	3,345	3,044	14,442	0,97
15	PONTES VIEIRA X VICENTE LEITE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,428	3,351	2,273	0,474	0,000	8,526	0,68
16	GODOFREDO MACIEL X ANT BANDEIRA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,449	3,529	2,632	2,833	2,981	14,425	1,00
17	DOM LUIS X VIRGILIO TAVORA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,270	3,333	3,646	2,480	2,619	2,884	15,231	1,07
18	JOVITA FEITOSA X HUMBE MONTE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,682	3,706	2,709	2,895	3,221	14,213	0,84
19	BEZERRA BEZERRA DE MENEZES X RUA RIBEIRO DA SILVA)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,751	3,463	2,596	3,160	2,695	12,664	0,78
20	RAUL BARBOSA X RUA MAJOR ARAÚJO AGUIAR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,813	3,546	2,609	2,865	2,733	12,566	0,74
21	VERBENA X VITAL BRASIL BRASIL	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,049	2,411	2,861	2,388	10,709	0,70
22	SANTOS DUMONT X DESEMBARGADOR MOREIRA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,266	3,312	3,591	2,313	2,305	1,218	13,004	0,92
23	EDUARDO GIRÃO X JÚLIO CÉSAR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,909	2,590	3,077	2,804	11,380	0,70
24	EDUARDO GIRÃO X DAMASC GIRÃO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,153	2,600	3,062	2,785	10,599	0,61
25	RAIMUNDO GIRÃO X RUI BARBOSA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,881	2,819	2,935	2,052	2,614	2,617	13,918	1,22
26	CEL CARVALHO X RUA HERMES P PARAHYBA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,900	3,109	3,304	2,500	2,805	2,651	15,268	0,88
27	EDUARDO GIRÃO X AV. DOS EX EXPEDICIONÁRIOS	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,771	2,729	3,080	3,049	10,630	0,56
28	ANSELMO NOGUEIRA X RUA EMÍ MENEZES	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,524	2,411	2,837	2,388	9,160	0,55
29	RAIMUNDO GIRÃO X ILDEFONSO ALBANO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,603	2,837	2,916	2,143	2,702	2,603	13,805	0,86
30	ISAC AMARAL X JOAQUIM NABUCO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,411	2,215	1,332	0,000	4,959	0,32
31	EDUARDO GIRÃO X LUCIANO CARNEIRO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,516	2,745	3,000	3,021	10,282	0,53
32	AV. ABOLIÇÃO, 2687 X AV DES. MOREIRA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,595	2,462	2,598	3,005	8,660	0,42
33	DEP PAULINO ROCHA X P GOMES	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,588	0,000	0,000	0,588	0,03
34	PONTES VIEIRA X AV VIRGÍLIO TÁVORA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,225	3,048	2,702	7,975	0,41
35	PRESIDENTE COSTA E SILVA X CIDADE JARDIM	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,806	2,739	2,247	6,792	0,34
36	TORRES CÂMARA X TIBÚRCI CAVALCANTE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,429	2,288	2,362	6,079	0,35

Fonte: elaborado pelo autor.