

# EFEITOS DO COMPORTAMENTO EVASIVO DOS CONDUTORES NA LOCALIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE FISCALIZAÇÃO AUTOMATIZADA EM RODOVIAS

**Lucas Franceschi**  
**Gustavo Garcia Otto**  
**Luciano Kaesemodel**  
**Amir Mattar Valente**

Laboratório de Transportes e Logística (LabTrans)  
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

**Nota:** o presente documento é uma tradução livre do artigo intitulado “*Effects of drivers’ evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems*”, dos mesmos autores, publicado na revista TRANSPORTES, v. 28 n. 5. Dessa forma, o presente documento **não passou por revisão por pares** nem por outros procedimentos de verificação e publicação.

Para citar esse trabalho, **utilizar o artigo original em inglês:**

FRANCESCHI, L.; OTTO, G. G.; KAESEMODEL, L.; VALENTE, A. M. Effects of drivers’ evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. **TRANSPORTES**, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2233>. Acesso em: 18 dez. 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2233.

## RESUMO

A localização de equipamentos de fiscalização em rodovias é um problema de interesse para várias entidades responsáveis pela manutenção da infraestrutura viária e fiscalização das leis de trânsito. É possível que nesse tipo de situação os veículos busquem ativamente evadir à fiscalização, para manter o lucro associado ao trânsito ilegal ou para evitar as punições da lei. Caso esse efeito não seja considerado nas etapas de planejamento dos sistemas de fiscalização, os transportadores podem facilmente evitar a fiscalização através de aplicativos de planejamento de rotas. Este trabalho procura investigar como tal comportamento evasivo altera a forma com que os equipamentos de fiscalização devem ser localizados na malha rodoviária. Primeiramente, realiza-se uma revisão de como esse problema vem sendo resolvido na literatura, e após isso são realizados experimentos numéricos com um dos principais modelos matemáticos utilizados. Os resultados mostram que a consideração matemática do comportamento de evasão não aumenta de forma expressiva o número de equipamentos que devem ser instalados na malha, mas otimiza a sua localização para que sejam capturados todos os caminhos possíveis para cada par origem-destino (dentro de uma distância máxima de desvio em relação ao menor caminho). Caso o planejamento seja feito sem a consideração da evasão e os veículos apresentem essa tendência, a fiscalização pode ser inefetiva. Por outro lado, caso no planejamento seja considerada uma tendência à evasão maior que a real, todos os veículos serão monitorados com sucesso pelos pontos de monitoramento, sem haver aumento expressivo no custo de implantação.

**Palavras-chave:** Sistemas de Transporte. Fiscalização. Localização. Evasão. Captura de fluxos.

## 1. INTRODUÇÃO

Para as entidades responsáveis pela manutenção da infraestrutura rodoviária, uma das principais preocupações é monitorar os veículos que utilizam a rodovia, para garantir a segurança viária. Os perigos existentes nas rodovias podem surgir, dentre várias situações, da presença de veículos em condições inapropriadas, ou pelos danos causados por esses veículos na infraestrutura rodoviária. Nesse contexto, caminhões com sobrepeso ou em velocidade excessiva são um grave risco para a segurança devido à possibilidade de perda de controle e a ocorrência de acidentes catastróficos. Isso é especialmente importante em locais com tráfego intenso de veículos de carga. Além disso, veículos com sobrepeso também causam dano exponencial ao pavimento, criando defeitos que comprometem a segurança dos outros usuários e requerem manutenção muito antes do planejado, o que significa um aumento expressivo de custo para a manutenção do nível de serviço das rodovias.

No entanto, os transportadores que desobedecem às regulações frequentemente fazem isso de forma consciente. Eles procuram, por exemplo, otimizar seus custos através do aumento da carga transportada em cada caminhão para além dos limites legais. Fazendo isso, no entanto, esses indivíduos ganham lucro às custas da sociedade, uma vez que geram riscos aos outros usuários e aumentam exponencialmente o custo de manutenção das rodovias, que é pago pelos próprios usuários através de tarifas de pedágio ou impostos (Transportation Research Board, 1990). Criando medidas de fiscalização nas rodovias, como as estações de pesagem automatizada, os transportadores irregulares são motivados a procurar formas através das quais eles podem evitar a fiscalização e continuar com o transporte ilegal. De fato, alguns estudos observaram, na prática, tais tendências evasivas, que incluem realizar viagens nos horários em que a fiscalização não esteja em funcionamento ou mesmo fazer desvios de rota para evitar a fiscalização (Cottrell, 1992; Cunagin *et al.*, 1997; Strathman and Theisen, 2002). Um estudo, por exemplo, identificou por meio do método de Dinâmica de Sistemas que o uso de veículos com sobrepeso de fato aumenta a produtividade e o lucro para os transportadores, e que tal lucro traz consigo desvantagens para a sociedade, como a deterioração da infraestrutura e o aumento das taxas de acidente (Ghisolfi *et al.*, 2019).

Como uma solução para esse problema, o avanço tecnológico trouxe a possibilidade da criação de estações automatizadas de monitoramento, que são capazes de aferir diversas características como o tamanho, velocidade, peso total e peso por eixo dos caminhões diretamente em pista. Tais tecnologias têm um potencial não somente para fiscalização, mas também para coleta contínua de dados, uma vez que o processo de aferição é completamente automatizado, e em vários casos não necessita nenhuma infraestrutura adicional além da instalação dos equipamentos em pista (Jacob and Feypell-de La Beaumelle, 2010).

Com a possibilidade da criação dessas estações de monitoramento contínuo e considerando a possibilidade de evasão da fiscalização pelos veículos, é necessário que a localização das estações de fiscalização nas rodovias seja planejada de forma apropriada, de forma que os fluxos sejam devidamente capturados sem que existam desvios simples ao redor das estações de fiscalização. Tal problema, em sua formulação matemática, consiste em alocar um número mínimo de estações de fiscalização com o objetivo de capturar o maior número possível de veículos, considerando ainda que tais veículos podem reagir à instalação dos equipamentos de fiscalização e mudar suas rotas originais (Mirchandani *et al.*, 1995).

---

Tradução livre realizada pelos autores. Para citação, utilizar o artigo original em inglês:

FRANCESCHI, L.; OTTO, G. G.; KAESEMODEL, L.; VALENTE, A. M. Effects of drivers' evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. **TRANSPORTES**, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2233>. Acesso em: 18 dez. 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2233.

Assim, se o objetivo do sistema de fiscalização é interceptar veículos que podem apresentar comportamento evasivo, não é suficiente que sejam utilizados modelos de localização baseados na intercepção do maior número de veículos possível, mas é necessário que o comportamento evasivo dos veículos seja levado em consideração na modelagem matemática do problema (Marković *et al.*, 2015). Caso contrário, existe o risco de que o sistema não seja efetivo para a fiscalização. Esse tipo de problema matemático é comumente conhecido como Problema de Captura de Fluxos Evasivos – PCFE (em inglês: *Evasive Flow-Capturing Problem*, EFCP)

Motivado por esse cenário, esse artigo apresenta um panorama do PCFE e como ele vem sendo resolvido na literatura recente. Além disso, são realizados experimentos numéricos com dados reais e que permitem analisar quão efetivo é um sistema de fiscalização quando sujeito a fluxos com comportamento evasivo em função do número de estações instaladas na rede. Também se analisa como o número de estações de fiscalização necessárias aumenta conforme o aumento da tendência evasiva dos veículos. Outros experimentos numéricos são realizados para investigar os efeitos de se considerar, no planejamento, uma tendência à evasão diferente daquela existente na prática. Esses experimentos demonstram que subestimar o comportamento evasivo pode levar a um Sistema de fiscalização inefetivo, enquanto sobrestimar tal comportamento garante que todos os fluxos serão cobertos, sem que aumente de forma significativa o número de estações necessárias na rede.

Não é o objetivo desse trabalho avançar o estado-da-arte matemático sobre os problemas PCFE e suas soluções, mas sim revisar e discutir as aplicações práticas da teoria e das técnicas atuais existentes para o PCFE e suas alternativas de solução, com foco especial aos planejadores de sistemas de transporte que lidam com qualquer tipo de sistema no qual os usuários podem buscar evadir da fiscalização através da alteração de rota.

Assim, a principal contribuição desse trabalho é mostrar como o comportamento evasivo dos veículos em condições ilegais muda a forma com que os sistemas de fiscalização devem ser planejados, e as consequências de não considerar esse comportamento durante o planejamento. Outra contribuição desse artigo é fornecer uma revisão atualizada das formulações atualmente existentes e dos seus algoritmos de solução.

As próximas seções estão organizadas da seguinte forma: na Seção 2, se apresenta um panorama dos modelos matemáticos que tratam desse problema, bem como outros trabalhos nos quais o problema de localização de estações de fiscalização é abordado. Na Seção 3, a metodologia utilizada para a condução do presente estudo é apresentada. A Seção 4 apresenta e discute os resultados obtidos nos experimentos realizados. Finalmente, a Seção 5 apresenta as conclusões desse trabalho, juntamente com as limitações do estudo e recomendações para trabalhos futuros.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Muitos problemas em sistemas de transportes e logística são representados por problemas matemáticos de localização de instalações. Os campos em que esses problemas são utilizados incluem localização de serviços de emergência (Boonmee *et al.*, 2017), de postos de abastecimento (MirHassani e Ebrazzi, 2012; Yildiz *et al.*, 2016), de centros de distribuição (Yan e Shuzhi, 2012) e de estações ferroviárias (Xiang *et al.*, 2010).

Uma subclasse dos problemas de localização são os problemas de captura de fluxo (PCF), em que a demanda é caracterizada por fluxos, e o objetivo é maximizar o número de veículos que encontram pelo menos uma instalação em seus trajetos (Berman *et al.*, 1992; Hodgson, 1990).

---

Tradução livre realizada pelos autores. Para citação, utilizar o artigo original em inglês:

FRANCESCHI, L.; OTTO, G. G.; KAESEMODEL, L.; VALENTE, A. M. Effects of drivers' evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. **TRANSPORTES**, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2233>. Acesso em: 18 dez. 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2233.

Ao propor este tipo de problema, Hodgson (1990) oferece alguns exemplos de instalações para as quais a demanda é caracterizada por fluxos: lojas de conveniência, postos de gasolina, terminais de autoatendimento bancário e *outdoors*. O autor argumenta que, para esses problemas, caso não seja considerado um modelo de captura de fluxo, mas sim realizada a alocação com base nos maiores volumes, pode ocorrer um efeito de “canibalismo” do fluxo, em que a demanda atendida por uma instalação é prejudicada pela existência de outras instalações do mesmo tipo em uma localização próxima. A formulação dos PCF tem sido utilizada para resolver diversas aplicações caracterizadas por fluxos (Gendreau *et al.*, 2000; Hodgson *et al.*, 1996; Liu *et al.*, 2019; MirHassani e Ebrazi, 2012; Šelmić *et al.*, 2010; Yang e Zhou, 1998).

Marković *et al.* (2015) propõem uma ampliação do PCF, que chamam de “Problema de Captura de Fluxos Evasivos” (PCFE). Neste problema, supõe-se que um fluxo pode viajar por múltiplos caminhos, desde que o desvio de seu caminho original não seja muito grande, e que um fluxo fiscalizado escolhe viajar pelo caminho mais curto que não seja coberto por uma instalação. Em seu trabalho, Marković *et al.* (2015) demonstra que o problema PCFE é estruturalmente diferente do problema PCF, e mostra que os algoritmos que resolvem com sucesso problemas PCF não são efetivos para resolver problemas PCFE.

O problema de se localizar estações de monitoração para capturar fluxos evasivos pode ser representado por um problema de otimização em dois níveis (Hooshmand and MirHassani, 2018), que é um caso especial da teoria dos jogos (Stackelberg, 1952). Problemas de otimização em dois níveis são tipicamente compostos por um “líder” e um “seguidor”, que possuem funções objetivo diferentes e conflitantes que são dependentes de variáveis compartilhadas. O “líder” é a parte que configura inicialmente as variáveis de decisão para otimizar sua função objetivo, e o “seguidor” é a parte que reage às decisões do líder e re-configura as suas variáveis de decisão de forma a otimizar a sua função objetivo. Algumas revisões de problemas de programação em múltiplos níveis podem ser encontrados na literatura (Colson *et al.*, 2007; Hongli *et al.*, 2011; Lu *et al.*, 2016).

No PCFE aplicado à fiscalização de veículos de carga em rodovias, a entidade de planejamento e fiscalização da rodovia é a parte líder, e os transportadores que desejam viajar em desrespeito às regulações é a parte seguidora. O objetivo da líder (fiscalização) é minimizar a ocorrência de fluxos ilegais não fiscalizados, e ela faz isso através da alocação de equipamentos de fiscalização que monitoram todos os veículos que passam por um determinado trecho de rodovia. O objetivo dos seguidores (transportadores irregulares), por sua vez, é viajar da sua origem a seu destino sem ser capturado por nenhum equipamento de fiscalização, e com mínimo custo de transportes. Eles fazem isso procurando pelo caminho mais curto entre origem e destino que não possua equipamento de fiscalização.

Problemas de otimização em dois níveis, no entanto, são intrinsecamente muito difíceis de resolver. A literatura demonstra que, mesmo as instâncias mais simples desse problema, são classificadas como NP-difícil (Colson *et al.* 2007). Por esse motivo, Marković *et al.* (2015) fizeram algumas suposições que permitiram que o problema fosse resolvido a um único nível. As suposições são:

1. Para cada viagem realizada na rede, existe um custo associado, que representa duas quantidades de forma simultânea: o custo de transporte para o transportador, e o custo do transporte ilegal para o planejador. Ambas as quantidades são proporcionais ao volume do fluxo e à distância da viagem;

---

Tradução livre realizada pelos autores. Para citação, utilizar o artigo original em inglês:

FRANCESCHI, L.; OTTO, G. G.; KAESEMODEL, L.; VALENTE, A. M. Effects of drivers' evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. **TRANSPORTES**, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2233>. Acesso em: 18 dez. 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2233.

2. Os seguidores buscam minimizar o custo de transporte para cada par origem-destino através de busca pelo caminho mais curto não monitorado. O líder busca minimizar os custos do transporte ilegal em toda a rede, através da localização de estações de fiscalização. Assim, os objetivos dos modelos líder e seguidor coincidem;
3. O custo associado a um certo fluxo aumenta linearmente com a distância viajada pelos veículos não fiscalizados;
4. Um determinado fluxo  $f$  (definido como um conjunto de veículos com mesma origem e destino) pode viajar ao longo dos  $k_f$  caminhos mais curtos entre sua origem e destino. O número  $k_f$  é determinado de tal forma que o caminho de número  $(k_f + 1)$  represente um desvio excessivo para o transportador (ou seja, o custo de fazer tal desvio supera o benefício obtido pelo transporte ilegal);
5. Um fluxo  $f$  é considerado capturado se existir uma estação de fiscalização em cada um dos seus  $k_f$  caminhos mais curtos; e
6. Um fluxo não capturado viaja pelo caminho mais curto dentre seus  $k_f$  caminhos possíveis que não esteja coberto por uma estação de fiscalização, uma vez que isso minimiza seus custos.

Como um resultado de adotar essas suposições, a minimização da distância de viagem dos veículos (que é o objetivo dos seguidores) coincide com a minimização do dano associado aos fluxos (que é o objetivo do líder) e desta forma o problema pode ser expresso como um programa de um nível único.

O modelo proposto por Marković *et al.* (2015) é um modelo de programação inteira binária, portanto possui solução exata. Uma limitação do modelo proposto, no entanto, é que a sua solução depende do pré-processamento dos menores caminhos entre cada par OD da malha em estudo, que possui custo computacional potencialmente proibitivo. Outros trabalhos subsequentes evoluíram do trabalho de Marković *et al.* (2015) para propor modelos mais computacionalmente eficientes e para considerar horizontes de planejamento com instalação gradual ao longo do tempo (Arslan *et al.*, 2018; Hooshmand e MirHassani, 2018; Marković *et al.*, 2017)

Em um outro trabalho, Lu *et al.* (2018) reformulam o PCFE com o objetivo de relaxar suposições tomadas no trabalho original. Neste caso, os autores disputam a suposição original de que os veículos viajam no menor caminho dentro de um conjunto de caminhos mais curtos entre os pontos de origem e destino, considerando que a escolha do trajeto das viagens é realizada considerando toda a malha rodoviária, sem limitação a um conjunto pré-determinado de menores caminhos. Para resolver o modelo, nesse caso, Lu *et al.* (2018) apresentam um problema de otimização de dois níveis, e propõem um processo heurístico para sua solução.

Na avaliação do modelo original, no entanto, Lu *et al.* (2018) consideraram um número fixo ( $k$ ) de caminhos mais curtos entre cada par OD. Considerando o número  $k$  dinâmico e variável em relação às possibilidades entre cada par OD, a motivação dos autores de que os veículos possam encontrar desvios além dos caminhos mais curtos considerados é contrariada pelo fato de que serão considerados todos os caminhos possíveis, na totalidade da malha rodoviária, que possuam um acréscimo percentual máximo de distância em relação ao caminho mais curto. Assim, considera-se que o benefício obtido através da formulação em dois níveis não compensa a perda da solução exata do problema e a dependência de processo heurístico. O modelo pode ser utilizado, no entanto, como uma alternativa para tratar de problemas maiores, no quais o pré-processamento dos caminhos possíveis é proibitivo.

---

Tradução livre realizada pelos autores. Para citação, utilizar o artigo original em inglês:

FRANCESCHI, L.; OTTO, G. G.; KAESEMODEL, L.; VALENTE, A. M. Effects of drivers' evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. **TRANSPORTES**, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2233>. Acesso em: 18 dez. 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2233.

De forma aplicada, o problema de localização de pontos de monitoramento em malhas rodoviárias já vem sendo resolvido em várias instâncias na literatura, através de diversos métodos matemáticos (AlGadhi, 2002; Ammarapala *et al.*, 2013; Kulović *et al.*, 2018; Mahmoudabadi e Seyedhosseini, 2013; Šelmić *et al.*, 2010). Além disso, os modelos de captura de fluxos evasivos revisados neste trabalho também apresentaram como motivação principal o problema de localização de pontos de fiscalização (Arslan *et al.*, 2018; Hooshmand e MirHassani, 2018; C.-C. Lu *et al.*, 2018; Marković *et al.*, 2015, 2017).

### 3. METHODOLOGY

Para estudar o problema de localização de pontos de monitoramento em malhas rodoviárias, será utilizado o modelo PCFE determinístico de Marković *et al.* (2015), que é apresentado nesta seção. Com este modelo, serão realizados experimentos numéricos em algumas situações reais e fictícias, que incluem dados da malha rodoviária e dos fluxos do estado do Espírito Santo, no Brasil.

#### 3.1. Problem formulation by Marković *et al.* (2015)

Denota-se  $G(N, A)$  como uma malha rodoviária bidirecional, onde  $N$  é o conjunto de nós da malha e  $A$  é o conjunto de arcos identificados por pares  $(i, j)$ , que representam o nó de início ( $i$ ) e fim ( $j$ ) do arco. Também se adota  $F$  como o conjunto de fluxos, e  $P_f$  o conjunto de caminhos possíveis para cada fluxo  $f \in F$ , composto pelos seus  $k_f$  menores caminhos. Define-se  $A_f^p$  como o conjunto de arcos que compõem o caminho  $p \in P_f$  do fluxo  $f \in F$ . Adicionalmente, denota-se como  $w_{ij}$  o custo de instalação de um ponto de monitoramento no arco  $(i, j)$ , e como  $d_f^p$  o dano associado caso o fluxo  $f \in F$  passe não-monitorado através do caminho  $p \in P_f$ . Ainda, define-se  $x_{ij}$  como uma variável binária que é igual a 1 se um ponto de monitoramento está instalado no arco  $(i, j)$  e 0 caso contrário.

Para permitir a formulação em um nível único, introduzem-se três conjuntos de variáveis auxiliares, que são usadas para checar se um fluxo é capturado e direcionar os fluxos para o caminho não-monitorado mais curto. As variáveis auxiliares são definidas da seguinte forma:

$$y_f^p = \begin{cases} 1 & \text{se existe pelo menos um ponto de monitoramento} \\ & \text{localizado no caminho } p \in P_f \text{ do fluxo } f \in F \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$y_f = \begin{cases} 1 & \text{se existe pelo menos um ponto de monitoramento} \\ & \text{localizado em todos os caminhos } p \in P_f \text{ do fluxo } f \in F \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$z_f^p = \begin{cases} 1 & \text{se o fluxo } f \in F \text{ viaja não-monitorado} \\ & \text{pelo caminho } p \in P_f \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

As variáveis auxiliares  $y_f^p$  e  $y_f$  são fixadas pelos valores escolhidos para  $x_{ij}$ , porém a variável  $z_f^p$  é uma variável de decisão, que representa a escolha do trajeto para cada fluxo e é restrita

---

Tradução livre realizada pelos autores. Para citação, utilizar o artigo original em inglês:

FRANCESCHI, L.; OTTO, G. G.; KAESEMODEL, L.; VALENTE, A. M. Effects of drivers' evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. **TRANSPORTES**, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2233>. Acesso em: 18 dez. 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2233.

pela localização dos pontos de monitoramento. Com essas definições, é possível escrever o modelo de captura de fluxo evasivos como um problema de programação linear binária:

$$\min_{x_{ij}, y_f^p, z_f^p \in \{0,1\}} \sum_{(i,j) \in A} w_{ij} x_{ij} + \sum_{f \in F} \sum_{p \in P_f} d_f^p z_f^p \quad (1)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{(i,j) \in A_f^p} x_{ij} \geq y_f^p \quad \forall f \in F, p \in P_f \quad (2)$$

$$z_f^p \leq 1 - y_f^p \quad \forall f \in F, p \in P_f \quad (3)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_f^p} x_{ij} \leq |A_f^p| y_f^p \quad \forall f \in F, p \in P_f \quad (4)$$

$$y_f \leq y_f^p \quad \forall f \in F, p \in P_f \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P_f} z_f^p \geq 1 - y_f \quad \forall f \in F \quad (6)$$

A função objetivo (1) é composta por dois termos. O primeiro termo minimiza o custo de instalação de estações de monitoramento. O segundo termo minimiza o custo associado aos fluxos cujos caminhos não sejam monitorados por nenhum equipamento de fiscalização. As restrições (2)-(4) definem a variável auxiliar  $y_f^p$ , garantindo: que o caminho deve ser considerado não-fiscalizado ( $y_f^p = 0$ ) se não existir nenhum equipamento de fiscalização nos seus arcos (restrição 2); que caso exista pelo menos um equipamento de fiscalização em um determinado caminho ( $y_f^p = 1$ ) então o caminho não deve ser considerado não-fiscalizado ( $z_f^p = 0$ ) (restrição 3); e que o caminho deve ser considerado monitorado ( $y_f^p \geq 1$ ) se qualquer um de seus arcos possuir uma estação de monitoração ( $x_{ij} = 1$ ) (restrição 4). Na restrição (4),  $|A_f^p|$  denota o número de elementos no conjunto de arcos que define um caminho. A restrição (5) define a variável auxiliar  $y_f$ , garantindo que, se qualquer um dos caminhos possíveis para um determinado fluxo  $f \in F$  estiver não-monitorado ( $y_f^p = 0 \quad \forall f \in F, p \in P_f$ ), então o fluxo também deve ser considerado não-monitorado ( $y_f = 0$ ). A restrição (6) garante que todos os fluxos não-monitorados ( $y_f = 0$ ) acrescentem à função de custo ( $z_f^p \geq 1$ ).

Através dessa formulação, é possível resolver de forma exata o problema de localização de pontos de monitoramento para captura de fluxos evasivos. Na prática, a solução para este problema é obtida em dois passos. Primeiramente a malha deve ser pré-processada para encontrar todos os  $k_f$  caminhos possíveis dentro de uma pré-determinada distância máxima de desvio em relação ao caminho mais curto. Isso pode ser feito utilizando o algoritmo de Yen (Yen, 1971). Em seguida, o problema deve ser resolvido através de qualquer software otimizador que tenha capacidade de resolver problemas de programação linear binária.

Tradução livre realizada pelos autores. Para citação, utilizar o artigo original em inglês:

FRANCESCHI, L.; OTTO, G. G.; KAESEMODEL, L.; VALENTE, A. M. Effects of drivers' evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. **TRANSPORTES**, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2233>. Acesso em: 18 dez. 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2233.

### 3.2. Conceitos e definições

Nesta seção, alguns conceitos de interesse para esse estudo são definidos de forma a facilitar a explicação dos experimentos realizados e dos resultados obtidos na sequência. Primeiramente, se considera que o custo de transporte para cada fluxo é igual à distância percorrida pelos veículos multiplicada pelo volume do fluxo. Com isso, está sendo considerado um custo unitário por veículo e por unidade de distância. Assim, o custo de cada caminho para cada fluxo ( $d_f^p$ ) é calculado como a distância viajada multiplicada pelo volume. A origem dessa definição está nos problemas de fiscalização de peso, em que o dano considerado é a perda em vida-útil do pavimento, e que é linearmente proporcional à distância percorrida pelos veículos com sobrepeso. Essa definição é também aplicável em outros contextos, como os transportes de materiais perigosos, em que o custo está relacionado ao risco que tais veículos representam na rodovia, que também aumenta com a distância percorrida pelos veículos (Šelmić *et al.* 2011).

Nos cenários em que uma determinada solução de fiscalização é avaliada, o “dano resultante” da solução é a soma do custo de todos os fluxos não monitorados. Isso coincide com o segundo termo da função objetivo (1). Para todos os cenários analisados, um caso de referência será criado, no qual não existe nenhum equipamento de fiscalização na rede viária (ou seja, todos os veículos viajam não monitorados pelos caminhos mais curtos), e o custo total resultante é anotado como valor de referência.

Com isso, denotamos “redução de dano” de um sistema de fiscalização a diferença percentual entre o dano resultante do sistema e o dano resultante do caso de referência. A quantidade complementar é chamada de “dano residual”, que é o custo que ainda existe após a instalação do sistema de fiscalização. Assim, se um determinado cenário apresenta uma redução de dano de 80%, por exemplo, isso significa que o sistema de fiscalização conseguiu eliminar com sucesso 80% do custo total existente no caso de referência, e o dano residual é 20%.

Veículos que são capturados pelas estações de fiscalização não acrescentam nenhum custo ao sistema, uma vez que se assume que os veículos conhecem de antemão a localização dos postos de fiscalização e das penalidades pela infração, caso no qual eles irão cessar suas atividades ilegais caso não exista nenhuma rota possível sem fiscalização. Isso, de fato, é uma simplificação; no entanto, ela é justificada pela consideração de que o funcionamento de um sistema de fiscalização se estende por longos períodos de tempo, dentro do qual há tempo suficiente para que os transportadores aprendam a localização dos postos de fiscalização e reajam de acordo.

Como mencionado anteriormente, O número  $k_f$  de caminhos possíveis para cada fluxo será escolhido para cada par OD como função de um parâmetro chamado “máximo desvio permitido”. Esse parâmetro quantifica a tendência de evasão dos veículos. O significado desse parâmetro é o seguinte: se for configurado um desvio máximo permitido de  $D\%$ , então todos os veículos vão aceitar viajar por caminhos de distância total até  $D\%$  maior que o seu menor caminho, para evitar passar por postos de fiscalização. Isso significa que  $k_f$  é escolhido de forma que o  $(k_f + 1)$ -ésimo caminho mais curto possua uma distância pelo menos  $D\%$  maior que o caminho mais curto e, portanto, seja um desvio excessivo.

---

Tradução livre realizada pelos autores. Para citação, utilizar o artigo original em inglês:

FRANCESCHI, L.; OTTO, G. G.; KAESEMODEL, L.; VALENTE, A. M. Effects of drivers' evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. **TRANSPORTES**, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2233>. Acesso em: 18 dez. 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2233.

### 3.3. Experimentos numéricos

Serão realizados alguns experimentos numéricos que irão controlar parâmetros de entrada para estudar a sensibilidade da solução ótima e caracterizar o problema em estudo. Os experimentos serão detalhados nesta seção, e os seus resultados apresentados na seção **Error! Reference source not found.**

#### 3.3.1. Experimento 1: redução do custo total em relação ao número de pontos alocados.

O objetivo deste experimento será verificar qual a eficiência da localização de um número variável de pontos de monitoramento na redução do custo total associado aos fluxos não-monitorados. O modelo será adaptado para localizar um número pré-determinado de pontos de monitoramento. Para isso, os custos de implantação  $w_{ij}$  serão considerados nulos, e será acrescentada ao modelo a restrição (7):

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij} \leq N \quad (7)$$

O cálculo dos  $k_f$  menores caminhos será realizado utilizando uma versão modificada do algoritmo de Yen (Yen 1971), no qual ao invés de buscar um dado número de caminhos mais curtos, busca-se todos os caminhos mais curtos dentro do desvio máximo permitido configurado. Este modelo será aplicado de forma repetitiva, variando o número de estações de monitoramento no sistema  $N$  e observando o valor final da função objetivo para cada caso.

#### 3.3.2. Experimento 2: efeitos do aumento da tendência de evasão no número de estações de monitoramento necessárias para cobrir todos os fluxos.

Neste caso, o objetivo será estudar o impacto da variação do desvio máximo percentual (em termos práticos, isso significa variar a tendência dos veículos à evasão) no número de pontos de monitoramento necessários para captura de todos os fluxos da malha.

Para isso, aos custos  $w_{ij}$  de implantação de pontos de monitoramento serão atribuídos valores muito menores (porém não-nulos) que os danos associados aos fluxos não-monitorados. Assim, o termo da função objetivo (1) referente ao dano associado ao fluxo não monitorado possuirá peso muito maior que o termo referente ao custo de instalação. Na prática, isso fará com que sejam localizados o menor número possível de pontos de monitoramento que garantam a cobertura completa dos fluxos da malha.

Com o modelo configurado dessa forma, será variado o desvio máximo percentual e observado qual o número de pontos necessários para cobrir todos os fluxos da malha.

#### 3.3.3. Experimento 3: consequências do planejamento sem consideração da evasão.

Para investigar a necessidade de se considerar o comportamento evasivo na localização de pontos de monitoramento com finalidade de fiscalização, será realizado um experimento no qual o planejamento será realizado com desvio máximo percentual igual a 0%. Com isso, serão considerados apenas os menores caminhos para cada fluxo, o que reflete a forma com que a localização de pontos de monitoramento é realizada em vários trabalhos atualmente (AlGadhi, 2002; Mahmoudabadi e Seyedhosseini, 2013; Šelmić *et al.*, 2011). Para resolver esse modelo,

---

Tradução livre realizada pelos autores. Para citação, utilizar o artigo original em inglês:

FRANCESCHI, L.; OTTO, G. G.; KAESEMODEL, L.; VALENTE, A. M. Effects of drivers' evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. **TRANSPORTES**, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2233>. Acesso em: 18 dez. 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2233.

os custos de instalação  $w_{ij}$  serão configurados na mesma forma que o Experimento 2. Com isso, será alocado o número mínimo de estações que é necessário para capturar todos os fluxos do sistema. O resultado desta localização será então fixado, e utilizado para calcular o valor da função objetivo, aumentando o desvio máximo percentual (até um limite de 50%).

Na sequência, outras instâncias desse experimento serão realizadas, nas quais o valor inicial de distância máxima considerada irá variar entre 0 e 50%, e as localizações escolhidas com tal planejamento utilizados na simulação de fluxos com tendências de evasão variáveis. Com isso, será possível observar os efeitos do comportamento evasivo em sistemas que consideraram de forma limitada tal comportamento na fase de planejamento.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os experimentos detalhados na seção 3.2 foram executados em um computador com processador Intel® Core™ i5-8400 de frequência 2.80GHz, com memória RAM de 16,0 GB e sistema operacional Windows 10 de 64 bits. Os modelos foram implementados utilizando a biblioteca PuLP (Mitchell *et al.*, 2011), disponível na linguagem de programação *Python*. Esta biblioteca permite a modelagem do problema de otimização e fornece a interface para alguns softwares otimizadores, dos quais utilizou-se o otimizador COIN-OR CBC (Forrest *et al.*, 2018).

Os resultados obtidos permitem que sejam traçadas algumas observações a respeito do problema de localização de pontos de monitoramento em malhas rodoviárias para captura de fluxos evasivos. Primeiramente, observa-se que o modelo apresentado por Marković *et al.* (2015) possui um grande potencial em ser utilizado para o planejamento das localizações de equipamentos de fiscalização automatizada. A utilidade desse método está principalmente no fato de que é encontrada uma solução ótima exata para um problema de alta complexidade, estando o modelo limitado apenas pela complexidade da malha viária e pela capacidade de computação disponível. O fato de a solução do modelo ser exata significa que todos os possíveis caminhos considerados no vetor de entrada  $P_f$  serão cobertos pela fiscalização. No entanto, conhecer quais são todos os caminhos possíveis para cada par OD é uma tarefa que pode ser proibitiva.

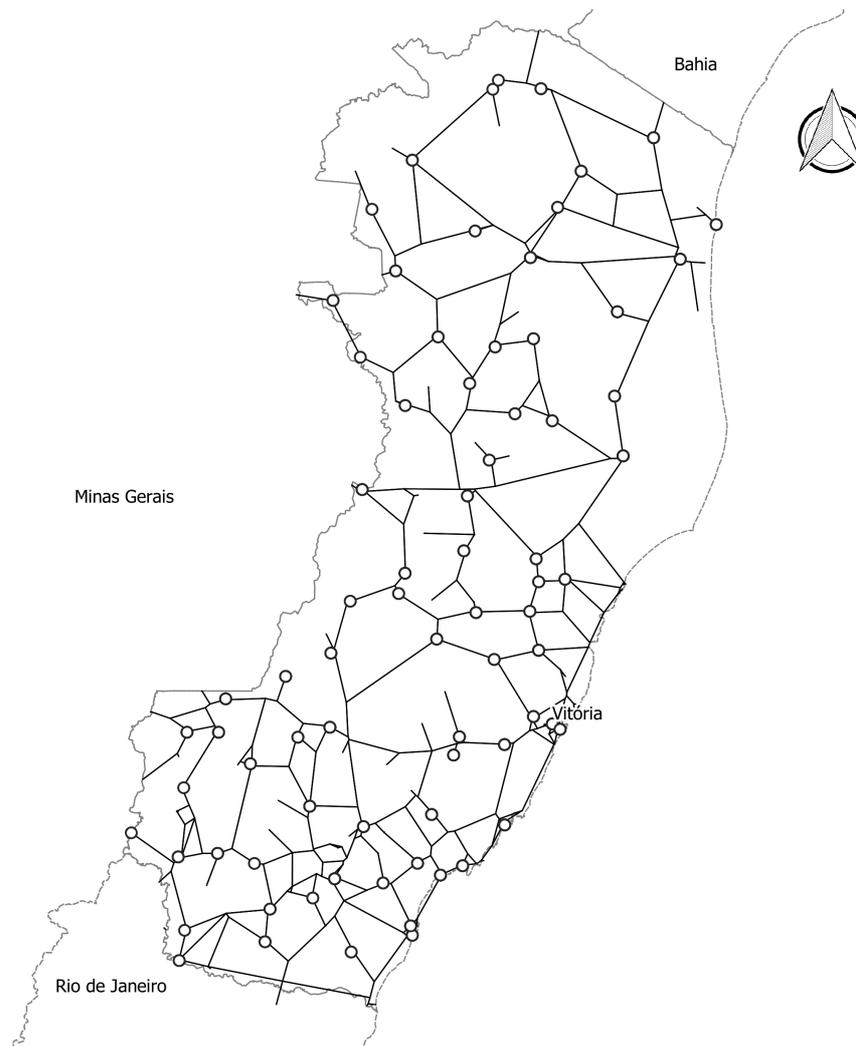
##### 4.1. Resultados do Experimento 1

A malha utilizada neste experimento representa o sistema rodoviário federal, estadual e municipal no estado do Espírito Santo, incluindo todas as rodovias pavimentadas situadas no estado. Não foram consideradas vias urbanas, nem vias com superfície em leito natural. A malha é composta por 368 nós, 902 arcos e 451 pares OD (Figura 1). Os pares OD e os volumes transportados foram obtidos através de dados reais referentes à circulação de mercadorias no estado do ES em 2017. Os menores caminhos entre cada par OD foram pré-processados com desvio máximo percentual de 20% (é possível considerar desvios menores apenas filtrando os objetos  $P_f$  no momento da execução). A consideração deste desvio máximo resultou em um total de 107.920 caminhos considerados entre os pares OD. O número  $k_f$  de caminhos possíveis para cada fluxo variou da seguinte forma: 61% dos fluxos possuíam menos de 10 caminhos possíveis, 25% entre 10 e 100 caminhos possíveis, 10% entre 100 e 1000 caminhos possíveis e 4% dos fluxos possuíam mais de 1000 caminhos possíveis, com 2 casos passando de 26.000 caminhos possíveis.

---

Tradução livre realizada pelos autores. Para citação, utilizar o artigo original em inglês:

FRANCESCHI, L.; OTTO, G. G.; KAESEMODEL, L.; VALENTE, A. M. Effects of drivers' evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. *TRANSPORTES*, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2233>. Acesso em: 18 dez. 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2233.



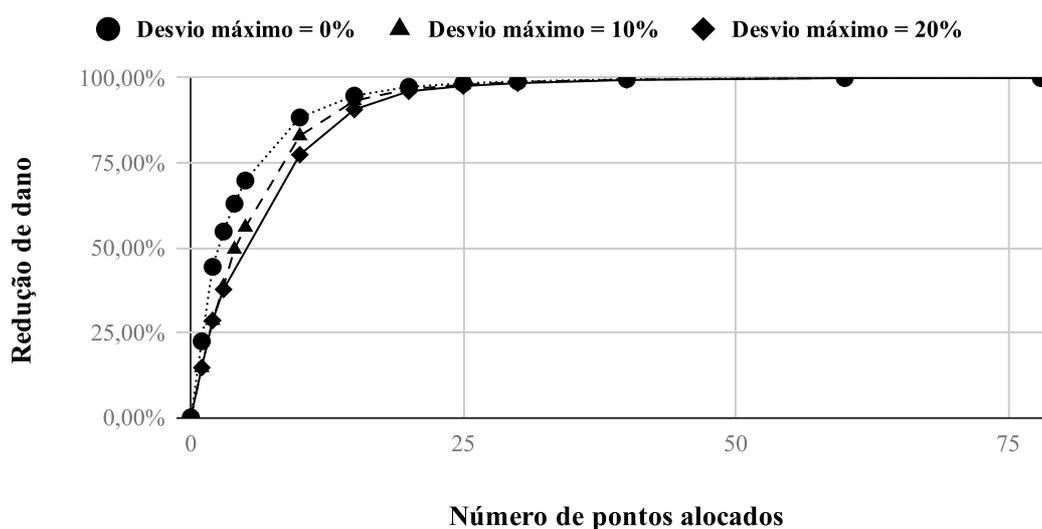
**Figura 1:** Malha representativa do estado do Espírito Santo (os círculos denotam os nós de origem e destino dos fluxos)

A solução do modelo foi obtida por três processos computacionais de forma paralela, que executaram uma sequência de instâncias da solução do problema. Criou-se uma fila compartilhada de tarefas, e cada um dos três processos coletou tarefas da mesma fila. Para cada instância executada, fixou-se um número  $N$  de pontos a serem alocados. O tempo médio observado para a solução do modelo, pelo solver COIN-OR CBC (Forrest *et al.*, 2018), foi de 14 horas. Este tempo não inclui o tempo do pré-processamento dos menores caminhos, que foi de aproximadamente 13 horas para o desvio máximo de 20%. A Figura 2 mostra o percentual de redução de custo obtido em função do número de pontos alocados na malha.

---

Tradução livre realizada pelos autores. Para citação, utilizar o artigo original em inglês:

FRANCESCHI, L.; OTTO, G. G.; KAESEMODEL, L.; VALENTE, A. M. Effects of drivers' evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. **TRANSPORTES**, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2233>. Acesso em: 18 dez. 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2233.



**Figura 2:** Percentual de redução do dano total na malha do ES por número de pontos alocados.

Observou-se que, nos três casos de desvio máximo percentual considerados, uma redução de mais de 95% no dano total da malha foi obtida com a alocação de 20 pontos, sendo necessários 78 pontos para a cobertura completa dos fluxos. Isso pode ser explicado pelo fato de que os maiores custos estão associados às viagens mais longas, que possuem uma maior parte dos trajetos possíveis em comum entre si. Além disso, a concentração dos fluxos de maiores volumes em algumas origens ou destinos também contribuiu para que a maioria do fluxo seja capturado com poucos pontos, uma vez que a cobertura da região no entorno desses pontos de concentração garante a captura de um grande número de viagens.

#### 4.2. Discussão do Experimento 1

Através dos resultados apresentados no item 4.1 (Experimento 1) é possível ter uma visão da eficiência do aumento do número de pontos de monitoramento na redução do dano associado aos fluxos. Observa-se na Figura 2 que uma expressiva redução dos danos à malha é obtida com um número baixo de pontos de monitoramento. Essa observação é devida ao fato de que a solução encontrada pelo modelo é exata, o que garante que em qualquer cenário será obtida a maior redução de dano possível. Assim, mesmo em casos com poucos pontos de monitoramento, o modelo irá buscar localizações onde são obtidos os melhores resultados com um número limitado de estações alocadas. Outro fato que colabora para esse resultado é que, na prática, os sistemas rodoviários apresentam uma concentração de nós com altos volumes, que podem estar localizados próximos de grandes centros de produção ou consumo, grandes cidades ou terminais de transporte, como portos, estações ferroviárias etc.

Note que, para o Experimento 1, para cada número de estações alocadas, foi encontrada uma nova solução para o modelo, independente das encontradas anteriormente. Ou seja, o aumento no número de estações não representa uma evolução de um sistema em instalação gradual, mas sim o aumento da eficiência do sistema em relação ao aumento dos investimentos.

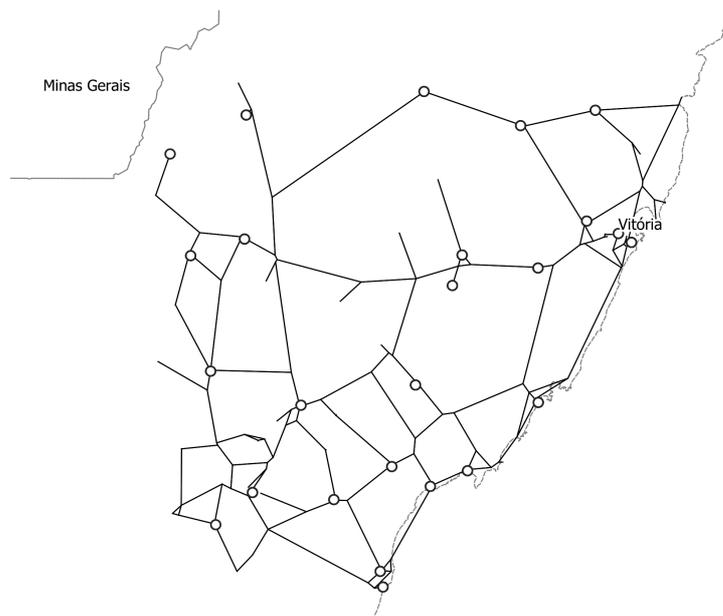
Tradução livre realizada pelos autores. Para citação, utilizar o artigo original em inglês:

FRANCESCHI, L.; OTTO, G. G.; KAESEMODEL, L.; VALENTE, A. M. Effects of drivers' evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. *TRANSPORTES*, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2233>. Acesso em: 18 dez. 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2233.

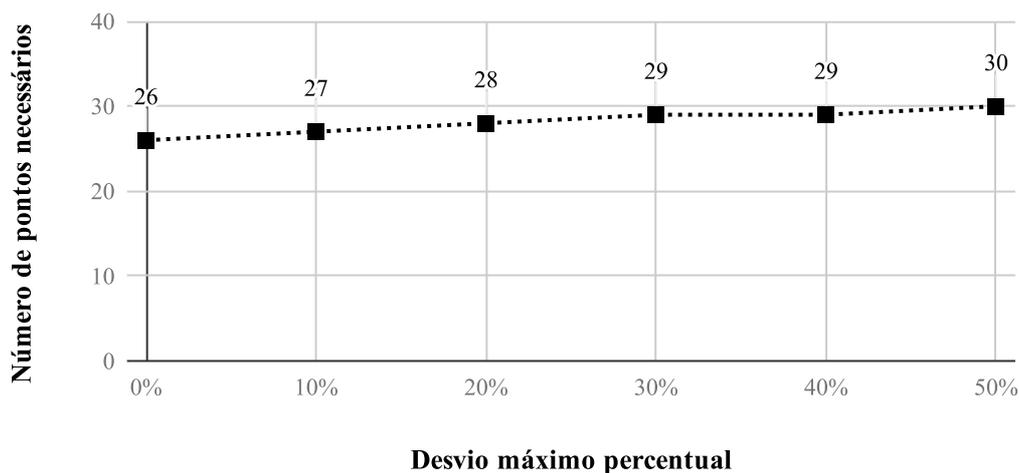
### 4.3. Resultados do Experimento 2

A malha utilizada nesse experimento representa a região centro-sul do estado do ES, incluindo as cidades de Vitória, Cachoeiro do Itapemirim e Viana, dentre outras que estão entre as principais cidades em termos de volumes na matriz OD. A redução no tamanho da malha foi realizada para se diminuir os custos computacionais da análise, uma vez que o pré-processamento da malha do ES com mais de 20% de distância máxima de desvio se demonstrou inviável.

A malha utilizada nesse experimento possui 146 nós, 368 arcos e 147 fluxos OD (Figura 3). O processamento da malha foi realizado até a tolerância de 50% para a evasão, o que resultou em um total de 78.137 caminhos possíveis entre os fluxos OD. A Figura 4 mostra os resultados obtidos nesse experimento



**Figure 3:** Malha utilizada no experimento 2 (os círculos denotam os nós de origem e destino dos fluxos)



**Figura 4:** Número de pontos necessários para captura de todos os fluxos na malha do caso 2 em função do desvio máximo permitido.

#### 4.4. Discussão do Experimento 2

Através da análise dos resultados apresentados no item 4.3 (Experimento 2), observa-se que a consideração do comportamento de evasão no planejamento da localização dos pontos de monitoramento na malha rodoviária não provoca um expressivo aumento no número de pontos necessários para captura dos fluxos. Esse resultado se deve ao fato de que os diversos caminhos possíveis para os diversos fluxos OD da malha possuem um grande número de arcos em comum. Com isso, a captura de todos os caminhos possíveis não exige a localização de mais pontos de monitoramento, mas sim a busca dos arcos mais utilizados entre todos os caminhos possíveis e que possibilitam a captura de todos os caminhos considerados. Isto significa que a obtenção de um sistema de fiscalização mais eficiente na captura de fluxos não exige um aumento expressivo dos investimentos necessários para instalação de equipamentos, mas sim que seja realizada a localização dos pontos de forma mais inteligente, para que os arcos que cubram a maior parte dos fluxos sejam considerados.

Outra consideração importante desse Experimento é que, para se considerar valores de desvio máximo permitido de até 50%, foi necessário reduzir a malha para uma região limitada. O motivo disso é que com valores tão elevados de distância máxima de desvio, o número de caminhos possíveis para cada fluxo aumenta de forma expressiva, e faz com que seja proibitivo realizar esse experimento em uma malha mais extensa. Isso também está associado ao modelo escolhido para esse estudo. Este trabalho utiliza o modelo de Marković et al. (2015) pois ele oferece uma solução exata e possui implementação simples. No entanto, existem outros modelos possíveis para solução do mesmo problema, incluindo um apresentado por Arslan *et al.* (2018) que também obtém a solução exata, sem necessidade de pré-processamento.

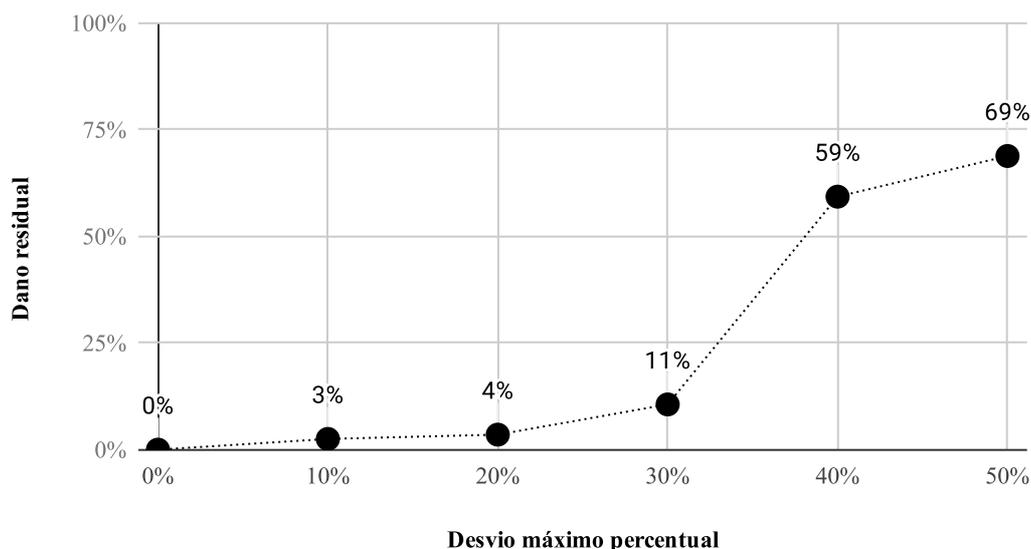
#### 4.5. Resultados do Experimento 3

A mesma malha utilizada no Experimento 2 foi utilizada nesse caso. Um planejamento inicial foi realizado considerando o desvio máximo permitido de 0%, e observou-se o custo total associado a fluxos com valores crescentes de desvio máximo permitido. O dano residual no sistema foi observado para todos os casos. Os resultados estão na Figura 5.

---

Tradução livre realizada pelos autores. Para citação, utilizar o artigo original em inglês:

FRANCESCHI, L.; OTTO, G. G.; KAESEMODEL, L.; VALENTE, A. M. Effects of drivers' evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. *TRANSPORTES*, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2233>. Acesso em: 18 dez. 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2233.



**Figura 5:** Dano residual para um planejamento sem consideração de evasão em função do desvio máximo percentual considerado para os fluxos.

Realizou-se também a mesma análise variando o desvio máximo percentual considerado no planejamento. Os resultados desta análise são expostos na Tabela 1. Essa tabela está estruturada da seguinte forma. Cada coluna representa um valor de desvio máximo permitido utilizado no momento do planejamento do sistema e localização dos equipamentos de fiscalização. Por sua vez, cada linha representa um valor de desvio máximo permitido utilizado para a simulação dos fluxos. O valor em cada célula representa o dano residual na malha, o que quantifica a habilidade dos veículos evadirem o sistema. Por exemplo, a primeira coluna representa o caso em que a localização dos equipamentos foi escolhida sem considerar as tendências de evasão. Os valores dessa coluna significam, por exemplo, que se os veículos estiverem dispostos a fazerem desvios de até 50% da sua distância inicial, então 68.8% dos veículos poderão continuar a viajar sem ser capturados pela fiscalização. A última coluna, por sua vez, mostra que se o planejamento inicial é realizado considerando uma distância máxima permitida de 50%, então todos os veículos com tendências de evasão menores que esse valor estarão capturados.

Tradução livre realizada pelos autores. Para citação, utilizar o artigo original em inglês:

FRANCESCHI, L.; OTTO, G. G.; KAESEMODEL, L.; VALENTE, A. M. Effects of drivers' evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. *TRANSPORTES*, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2233>. Acesso em: 18 dez. 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2233.

**Tabela 1:** Dano residual com variação do desvio máximo percentual considerado no planejamento e no fluxo.

Desvio máximo adotado pelo fluxo	Desvio máximo percentual considerado no planejamento					
	0%	10%	20%	30%	40%	50%
0%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
10%	2,512%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
20%	3,521%	0,286%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
30%	10,604%	1,304%	0,022%	0,000%	0,000%	0,000%
40%	59,309%	59,395%	0,026%	52,780%	0,000%	0,000%
50%	68,838%	76,938%	0,028%	67,426%	0,001%	0,000%

#### 4.6. Discussão do Experimento 3

Os resultados do item 4.5 (Experimento 3) mostram que, caso os transportadores tenham disposição realizar desvios para evitar a fiscalização, e esse fato não tenha sido considerado no planejamento da localização dos pontos de monitoramento, o sistema pode ser insuficiente para reduzir os danos associados aos fluxos, e os investimentos para instalação do sistema podem não ter um retorno adequado. Para a malha considerada, é possível verificar que o sistema planejado sem consideração da evasão (desvio máximo permitido foi 0%) sofreu perdas significativas de eficiência quando os veículos apresentaram tendências de desvios maiores que 30%. Na realidade, os lucros obtidos pelos transportadores em realizar as práticas ilegais podem compensar um aumento de 30% na distância percorrida.

Os dados da Tabela 1 mostram que a consideração, no planejamento, de valores de desvio máximo percentual menores do que o desvio máximo adotado pelo fluxo evasivo geram um comportamento imprevisível. Uma vez que a efetividade do sistema depende da escolha de localização para os pontos de monitoramento, e não apenas do número de pontos instalados, é possível que as escolhas realizadas para valores mais baixos de desvios máximos permitidos sejam boas escolhas para lidar com fluxos mais evasivos, o que foi o caso para o sistema planejado com desvio máximo de 20%, na Tabela 1.

A mesma tabela mostra, no entanto, que todos os fluxos com valores de desvio máximo permitido menores que o valor considerados no planejamento foram completamente considerados. Por esse motivo, é possível afirmar que, no planejamento da localização de equipamentos de fiscalização automatizada, a tendência à evasão deve ser superestimada. Com isso não há dúvidas de que todos os fluxos ao longo dos caminhos considerados serão capturados pelas estações de fiscalização. O custo de realizar tal sobrestimação não está no aumento dos custos de implantação do sistema (pois o número de postos necessários não deverá aumentar significativamente, conforme Experimento 2), mas sim no custo computacional da análise necessária para o apropriado planejamento do sistema. Esse esforço computacional, no entanto, é mínimo quando comparado à magnitude dos horizontes temporais considerados no planejamento de tais sistemas, que normalmente se estendem por décadas.

Tradução livre realizada pelos autores. Para citação, utilizar o artigo original em inglês:

FRANCESCHI, L.; OTTO, G. G.; KAESEMODEL, L.; VALENTE, A. M. Effects of drivers' evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. **TRANSPORTES**, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2233>. Acesso em: 18 dez. 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2233.

## 5. CONCLUSIONS

O objetivo desse estudo foi demonstrar como as tendências evasivas dos veículos em tráfego irregular mudam a forma com que a localização dos equipamentos automatizados de fiscalização deve ser realizada. Também foi objetivo desse estudo apresentar referências relevantes sobre como tal localização deve ser realizada de forma a considerar tal comportamento. Através da análise de literatura e pela realização de experimentos numéricos, esse trabalho chegou às seguintes conclusões:

- A consideração do comportamento de evasão no planejamento da localização dos pontos de monitoramento não aumenta de forma expressiva o número de pontos necessários para capturar os fluxos, mas sim otimiza os locais escolhidos para instalação;
- Com o modelo de captura de fluxos evasivos, uma grande redução do dano associado ao tráfego ilegal pode ser obtida com um número reduzido de pontos de monitoramento em relação à captura completa. Isso depende da topologia da malha e da distribuição dos fluxos. Por exemplo: no caso real do estado do ES, foram necessários 20 pontos para cobrir mais de 95% dos fluxos, e 78 pontos para cobrir 100%;
- Se o fluxo que se deseja fiscalizar apresenta comportamento evasivo, e isso não tiver sido considerado no planejamento, então poderão existir rotas de fuga com um desvio curto do caminho original, e o sistema poderá não ser efetivo em evitar o tráfego ilegal;
- Por outro lado, se o planejamento adotar um desvio máximo maior do que o adotado pelos veículos na realidade, os fluxos ainda estarão cobertos pela localização dos pontos de monitoramento, e essa consideração não deverá gerar custos excessivos de infraestrutura.

Esse estudo também apresenta algumas limitações, listadas abaixo, juntamente com recomendações para trabalhos futuros.

- Primeiramente, o modelo utilizado para realizar os estudos (Marković *et al.*, 2015) requer que todos os caminhos possíveis para cada par origem-destino sejam pré-processados. Isso é bastante custoso e, por esse motivo, o tamanho das malhas analisadas foi limitado. Futuros estudos sobre esse assunto podem considerar modelos diferentes, o que poderia permitir a análise de malhas mais extensas;
- Esse estudo não considerou os custos reais de transporte e instalação de equipamentos, mas sim utilizou quantidades proporcionais, que garantiram a otimalidade da solução para os experimentos realizados. Assim, estudos seguintes poderiam considerar os custos reais de transporte e instalação de equipamentos para uma aplicação específica, de forma a obter observações mais específicas sobre o planejamento financeiro de tal aplicação;
- Estudos futuros podem continuar esse trabalho através da consideração de cenários nos quais a instalação de equipamentos se dá de forma gradual, o que representa de forma mais próxima a forma com que os sistemas de fiscalização são instalados gradualmente ao longo do tempo. Isso permitiria obter observações acerca de quais localizações deveriam ser priorizadas, por exemplo.

---

Tradução livre realizada pelos autores. Para citação, utilizar o artigo original em inglês:

FRANCESCHI, L.; OTTO, G. G.; KAESEMODEL, L.; VALENTE, A. M. Effects of drivers' evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. **TRANSPORTES**, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2233>. Acesso em: 18 dez. 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2233.

### Agradecimentos

Os autores são gratos pelo apoio recebido do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), cujo interesse no assunto motivou este estudo. Os autores também agradecem pela contribuição da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) na viabilização dessa pesquisa.

### REFERÊNCIAS

- AlGadhi, S. A. H. (2002). "Optimizing Truck Weigh Stations' Locations on the Highway Network of Saudi Arabia." *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 14(2), 147–163. DOI: 10.1016/S1018-3639(18)30750-5.
- Ammarapala, V.; T. Chinda; P. Udomworarat; T. Rongwiriyanich; A. Khampanit; S. Suanmali e B. Samphanwattanachai (2013). "Selection of weigh station locations in Thailand using the analytic hierarchy process." *Songklanakarinn Journal of Science and Technology*, 35(1), 81–90.
- Arslan, O.; O. Jabali e G. Laporte (2018). "Exact Solution of the Evasive Flow Capturing Problem." *Operations Research*, 66(6), 1625–1640. DOI: 10.1287/opre.2018.1756.
- Cottrell Jr., B. H. (1992). *The Avoidance of Weigh Stations in Virginia by Overweight Trucks*. Virginia Transportation Research Council, Charlottesville.
- Benekohal, R. F.; Y. M. El-Zohairy e S. Wang (2011). "Truck Travel Time Around Weigh Stations: Effects of Weigh in Motion and Automatic Vehicle Identification Systems." *Transportation Research Record*, 3(2), 1712–1719. DOI: 10.3141/1716-16.
- Berman, O.; R. C. Larson e N. Fouska (1992). "Optimal Location of Discretionary Service Facilities." *Transportation Science*, INFORMS, 26(3), 201–211. DOI: 10.1287/trsc.26.3.201.
- Boonmee, C.; M. Arimura e T. Asada (2017). "Facility location optimization model for emergency humanitarian logistics." *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Elsevier Ltd, 24(January), 485–498. DOI: 10.1016/j.ijdr.2017.01.017.
- Colson, B.; P. Marcotte e G. Savard (2007). "An overview of bilevel optimization." *Annals of Operations Research*, 153(1), 235–256. DOI: 10.1007/s10479-007-0176-2.
- Cunagin, W.; W. A. Mickler e C. Wright (1997). "Evasion of Weight-Enforcement Stations by Trucks." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1570(1), 181–190. DOI: 10.3141/1570-21.
- Forrest, J.; T. Ralphs; S. Vigerske; LouHafer; B. Kristjansson; Jpfasano; EdwinStraver; M. Lubin; H. G. Santos; Rlougee e M. Saltzman (2018). "Coin-Or/Cbc: Version 2.9.9." Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.1317566.
- Gendreau, M.; G. Laporte e I. Parent (2000). "Heuristics for the Location of Inspection Stations on a Network." *Naval Research Logistics*, 47(4), 287–303. DOI: 10.1002/(SICI)1520-6750(200006)47:4<287::AID-NAV2>3.0.CO;2-R.
- Ghisolfi, V.; G. M. Ribeiro; G. L. D. Chaves; R. F. Orrico Filho; I. C. S. Hoffmann e L. R. Perim (2019). "Evaluating Impacts of Overweight in Road Freight Transportation: A Case Study in Brazil with System Dynamics." *Sustainability*, v. 11, p. 3128. DOI: 10.3390/su11113128.
- González, P. H.; G. Climaco; G. R. Mauri; B. L. Vieira; G. M. Ribeiro; R. D. Orrico Filho; L. Simonetti; L. R. Perim e I. C. S. Hoffmann (2019). New approaches for the traffic counting location problem. *Expert Systems with Applications*, v. 132, p. 189-198. DOI: 10.1016/j.eswa.2019.04.068.
- Hodgson, M. J. (1990). "A Flow-Capturing Location-Allocation Model." *Geographical Analysis*, 22(3), 270–279. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1990.tb00210.x.
- Hodgson, M. J.; K. E. Rosling; A. Leontien e G. Storrier (1996). "Applying the flow-capturing location-allocation model to an authentic network: Edmonton, Canada." *European Journal of Operational Research*, 90(3), 427–443. DOI: 10.1016/0377-2217(95)00034-8.
- Hongli, G.; L. Juntao e G. Hong (2011). "A survey of bilevel programming model and algorithm." *Proceedings - 2011 4th International Symposium on Computational Intelligence and Design, ISCID 2011*, 2, 199–203. DOI: 10.1109/ISCID.2011.151.
- Hooshmand, F. e S. A. MirHassani (2018) "An Effective Bilevel Programming Approach for the Evasive Flow Capturing Location Problem." *Networks and Spatial Economics*, Springer Nature America, Inc., 18(4), 909–935. DOI: 10.1007/s11067-018-9415-0.
- Jacob, B. e V. Feypell-de La Beaumelle (2010). "Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology." *IATSS Research*, 34(1), 9–15. DOI: 10.1016/j.iatssr.2010.06.003.
- Kulović, M.; Z. Injac; S. Davidović e I. Posavac (2018). "Modelling Truck Weigh Stations' Locations based on Truck Traffic Flow and Overweight Violation: A Case Study in Bosnia and Herzegovina." *PROMET - Traffic & Transportation*, 30(2), 163–171. DOI: 10.7307/ptt.v30i2.2423.
- Liu, K.; Q. Li e Z. H. Zhang (2019). "Distributionally robust optimization of an emergency medical service

---

Tradução livre realizada pelos autores. Para citação, utilizar o artigo original em inglês:

FRANCESCHI, L.; OTTO, G. G.; KAESEMODEL, L.; VALENTE, A. M. Effects of drivers' evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. **TRANSPORTES**, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2233>. Acesso em: 18 dez. 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2233.

- station location and sizing problem with joint chance constraints.” *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier Ltd, 119, 79–101. DOI: 10.1016/j.trb.2018.11.012.
- Lu, C.-C.; S. Yan; H.-C. Ko e H.-J. Chen (2018). “A Bilevel Model With a Solution Algorithm for Locating Weigh-In-Motion Stations.” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 19(2), 380–389. DOI: 10.1109/TITS.2017.2696046.
- Lu, J.; J. Han; Y. Hu e G. Zhang (2016). “Multilevel decision-making: A survey.” *Information Sciences*, Elsevier Inc., v. 346–347, p. 463–487. DOI: 10.1016/j.ins.2016.01.084.
- Mahmoudabadi, A. e S. M. Seyedhosseini (2013). “Improving the efficiency of weigh in motion systems through optimized allocating truck checking oriented procedure.” *IATSS Research*, 36(2), 123–128. DOI: 10.1016/j.iatssr.2012.08.002.
- Marković, N.; I. O. Ryzhov e P. Schonfeld (2015). “Evasive flow capture: Optimal location of weigh-in-motion systems, tollbooths, and security checkpoints.” *Networks*, Wiley-Blackwell, 65(1), 22–42. DOI: 10.1002/net.21581.
- Marković, N.; I. O. Ryzhov e P. Schonfeld (2017). “Evasive flow capture: A multi-period stochastic facility location problem with independent demand.” *European Journal of Operational Research*, Elsevier B.V., 257(2), 687–703. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.08.020.
- Mirchandani, P. B.; R. Rebello e A. Agnetis (1995). “The Inspection Station Location Problem In Hazardous Material Transportation: Some Heuristics And Bounds.” *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 33(2), 100–113. DOI: 10.1080/03155986.1995.11732271.
- MirHassani, S. A. e R. Ebrazi (2012). “A Flexible Reformulation of the Refueling Station Location Problem.” *Transportation Science*, 47(4), 617–628. DOI: 10.1287/trsc.1120.0430.
- Mitchell, S.; M. O’Sullivan e I. Dunning (2011). “PuLP: A Linear Programming Toolkit for Python.” *Department of Engineering Science, The University of Auckland*.
- Šelmić, M.; N. Bešinović e D. Teodorović (2011). “Locating weigh-in-motion checkpoints in traffic networks using genetic algorithm.” *E-Society Journal*, 2, 55–66.
- Šelmić, M.; D. Teodorović e K. Vukadinovic (2010). “Locating inspection facilities in traffic networks: An artificial intelligence approach.” *Transportation Planning and Technology*, 33(6), 481–493. DOI: 10.1080/03081060.2010.505047
- Stackelberg, H. V. (1952). *The Theory of the Market Economy*. Oxford University Press.
- Strathman, J. G. e G. Theisen (2002). *Weight enforcement and evasion: Oregon case study*.
- Transportation Research Board. (1990). *Truck Weight Limits: Issues and Options*. Transportation Research Board. DOI: 10.17226/11349
- Xiang, R.; G. Lu e D. He (2010). “Simulated annealing algorithm for solving A bi-level optimization model on high-speed railway station location.” *ICIC 2010 - 3rd International Conference on Information and Computing*, IEEE, 2(1), 159–162. DOI: 10.1109/ICIC.2010.134
- Yan, G. e Z. Shuzhi (2012). “A Study of Distribution Center Location and Transport Routes Optimization Based on Supply Chain.” *World Automation Congress*, IEEE, 4–7.
- Yang, H. e J. Zhou (1998). “Optimal traffic counting locations for origin–destination matrix estimation.” *Transportation Research Part B: Methodological*, 32(2), 109–126. DOI: 10.1016/S0191-2615(97)00016-7
- Yen, J. Y. (1971). “Finding the K Shortest Loopless Paths in a Network.” *Management Science*, 17(11), 712–716.
- Yildiz, B.; O. Arslan e O. E. Karaşan (2016). “A branch and price approach for routing and refueling station location model.” *European Journal of Operational Research*, 248(3), 815–826. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.05.021

---

Tradução livre realizada pelos autores. Para citação, utilizar o artigo original em inglês:

FRANCESCHI, L.; OTTO, G. G.; KAESEMODEL, L.; VALENTE, A. M. Effects of drivers’ evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. **TRANSPORTES**, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2233>. Acesso em: 18 dez. 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2233.