

Critérios para Seleção da Rota Ambiental para os Deslocamentos Gerados por Veículos em um Polo Gerador de Viagens

De Oliveira, Luis César¹, Alamy Filho, José Eduardo², Sorratini, José Aparecido³, Ferreira, Cristiano Dorça⁴, Ritt, Humberto⁵, Finzer, José Roberto Delalibera⁶

¹Engenharia Civil, Universidade De Uberaba, Brasil: Orcid.Org/ 0009-0002-4470-1848

²Engenharia Civil, Universidade Federal De Uberlândia, Brasil: Orcid.Org/ 0000-0001-5207-9396

³Engenharia Civil, Universidade Federal De Uberlândia, Brasil: Orcid.Org/ 0000-0001-9070-6418

⁴Engenharia Civil, Universidade De Uberaba, Brasil, Orcid.Org/ 0009-0005-3533-0012

⁵Engenharia, Universidade De Uberaba, Brasil, Orcid.Org/ 0009-0009-3058-4186

⁶PPGEQ, Engenharia Química, Universidade De Uberaba, Brasil, Orcid.Org/0000-0001-6139-3619

Resumo:

As descargas veiculares de poluentes são, de maneira geral, uma das principais fontes que prejudicam a qualidade do ar em zonas urbanas. Este artigo analisou a emissão atmosférica de gases gerados a partir da queima de combustível, para veículos que partem de um polo gerador de viagens (PGV). O objetivo principal consistiu em selecionar o itinerário mais favorável em termos ambientais, aqui chamado de rota ambiental. Foram analisados diferentes percursos que interligam o Terminal Rodoviário de Uberaba, MG com a rodovia BR-050, principal via de saída dos ônibus intermunicipais da cidade. Os gradientes de emissão de hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NOx) foram calculados com uso do Traffic Software Integrated System (TSIS), considerando um veículo individual partindo nos horários de maior demanda de passageiros no PGV. A rota ambiental foi selecionada por uma análise multicritério. Foram propostos os critérios das Menores Emissões Adimensionais (MeEA), da Curva de Permanência de Emissões (CPE) e a quantificação das Massas Acumuladas (MAc). No domínio de aplicação desta pesquisa, todos os critérios conduziram para a escolha da Rota 1 que, apesar de não conter o menor percurso, proporcionou as menores emissões gasosas. Os critérios aqui propostos apresentam aplicação geral direta e podem ser utilizados em qualquer cidade no auxílio aos órgãos municipais em decisões para atenuar a poluição atmosférica de origem veicular.

Palavras-Chave: Poluição atmosférica; Poluição veicular; Rota ambiental; Polo gerador de viagens; TSIS.

Date of Submission: 19-02-2024

Date of Acceptance: 29-02-2024

I. Introdução

As cidades constituem locais onde se pode observar grande diversidade de fontes poluentes, tanto da água, quanto do solo e do ar. No caso específico da poluição atmosférica urbana, indústrias e veículos automotores são os maiores responsáveis por emissões de poluentes. De acordo com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada [1], o aumento da frota de veículos automotores no Brasil tem impactado de forma incisiva o meio ambiente urbano. Ainda segundo o IPEA, dentre os principais impactos citam-se os congestionamentos, com consequente aumento do tempo de trânsito e da poluição veicular. A poluição veicular é um termo genérico que abrange não só a emissão de substâncias para a atmosfera, mas também o surgimento de ruídos e a degradação visual pelo excesso de veículos nas vias.

No contexto das emissões de origem veicular, os poluentes atmosféricos podem ter abrangência global ou local. No primeiro caso, destacam-se substâncias que se acumulam na atmosfera, contribuindo para amplificar o efeito estufa no planeta. Já os poluentes veiculares locais afetam diretamente as adjacências das vias de transporte. Na Tabela 1, adaptada de [2], são relacionados os principais poluentes atmosféricos de origem veicular, bem como seus efeitos nocivos sobre o meio ambiente

Tabela 1: Principais poluentes veiculares e impactos decorrentes de sua emissão para a atmosfera.

Poluente	Abrangência	Principais impactos
Gás Carbônico (CO ₂)	Global	Potencialização do efeito estufa
Monóxido de Carbono (CO)	Local	Redução da oxigenação do sangue. Altos níveis de CO estão associados à redução da visão e dos reflexos, bem como da capacidade de estimar intervalos de tempo, de aprendizado e de realizar trabalhos
Hidrocarbonetos (HC) ou Compostos Orgânicos Voláteis (COV)	Local	Combustíveis parcialmente queimados formam o <i>smog</i> – formação de uma névoa densa devido à grande concentração de ozônio (O ₃) na troposfera – e originam compostos cancerígenos. Os HC são precursores do ozônio.
Material Particulado (MP)	Local	Penetração nas defesas do organismo, atingindo os alvéolos pulmonares e causando irritações, asma, bronquite e câncer de pulmão. Degradação de imóveis próximos aos corredores de transporte. Redução da visibilidade
Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	Local	Formação de dióxido de nitrogênio e na formação do <i>smog</i> fotoquímico e chuva ácida. É um precursor do ozônio. Aumento da sensibilidade à asma e à bronquite e redução da resistência a infecções respiratórias
Óxidos de Enxofre (SO _x)	Local	Precursor do ozônio, formando a chuva ácida e degradando vegetação e imóveis. Desconforto na respiração, doenças respiratórias, agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares pré existentes

Fonte: adaptado de [2].

Veículos movidos a diesel constituem a principal fonte veicular de CO₂, de forma que, o aumento da frota fatalmente resulta no incremento contínuo das emissões desse gás. Segundo o IPEA [1], veículos de transporte coletivo tendem a emitir mais CO₂ por quilômetro rodado. A despeito disto, quando se quantificam as emissões por passageiros, o transporte privado apresenta índices superiores. Levando em conta apenas o transporte rodoviário no Brasil, [2] destaca que os sistemas de ônibus, os quais representam mais de 60% dos deslocamentos urbanos e mais de 95% dos deslocamentos intermunicipais, respondem por 7% das emissões totais de CO₂. Em contrapartida, automóveis e utilitários leves, que apresentam menos que 30% de participação no total de viagens, contribuem com a metade das emissões dessa substância. A partir de registros históricos coletados nos períodos de greve do transporte público de Barcelona, entre os anos 2005 e 2016, [3] verificaram que a qualidade do ar piora durante os dias de paralização. Dados como esses justificam a importância de se incentivar o uso do transporte coletivo nos deslocamentos cotidianos.

[1] O IPEA ainda destaca que, no Brasil, a partir de meados da década de 1990, notou-se uma redução considerável das emissões de poluentes locais como CO, HC, NO_x e MP. Contribuíram para isso os avanços na tecnologia de produção de motores, bem como o uso de biocombustíveis, como o álcool e o biodiesel. A despeito disso, cenários de queda são vulneráveis e podem ser revertidos com o aumento dos congestionamentos. Dados da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) têm comprovado que, na Região Metropolitana de São Paulo, automóveis e motocicletas respondem por cerca de 90% das emissões de CO e 70% das emissões de HC. Já os veículos pesados a diesel são responsáveis pela maioria das emissões de NO_x, com participação expressiva nas descargas de MP e SO_x.

[4] Destacam que polos geradores de viagens (PGV), como estações rodoviárias e ferroviárias, pelo grande adensamento de veículos nas suas adjacências constituem importantes focos pontuais de poluição atmosférica urbana. Mas, além disso, e em decorrência dos seus deslocamentos nas vias, os veículos atuam como fontes móveis e lineares de poluição. Dessa forma, transeuntes que circulem recorrentemente nas rotas trafegadas por veículos pesados ficam sujeitos a exposições diretas de poluentes veiculares. Estudos como o de [5], realizado a partir de séries históricas horárias de concentrações de NO_x, MP e CO, medidas nas principais vias da cidade de Copenhague, mostraram que, do ponto de vista do transeunte, é possível a busca de rotas de menor exposição. Tais rotas nem sempre são as mais curtas e devem ser trafegadas fora dos horários de pico. [6], A partir do monitoramento de poluentes no interior de cabinas de ônibus escolares, mostraram que os próprios passageiros também estão sujeitos a exposições consideráveis de poluentes.

A logística de meios de transportes historicamente tem se baseado em modelos que visam a minimizar custos e agilizar a entrega de produtos. Não obstante, trabalhos recentes também têm procurado encontrar rotas que reduzam a emissão de poluentes. Dentre esses cita-se o estudo de [7], que utilizou um modelo misto de programação linear, verificando a viabilidade de uma reorganização das rotas dos ônibus urbanos em Madrid, alocando os veículos já existentes em rotas que produzam menor emissão de CO₂ e de NO_x. [8] Divulgou experimentos numéricos com o *Comprehensive Modal Emissions Model* (CMEM), o qual relaciona o consumo de combustível à emissão de carbono. [9] Construíram um modelo matemático genérico para otimização de rotas ambientalmente mais adequadas. [10] Resolveram um *Green Vehicle Routing Problem* (G-VRP) com intuito de definir rotas para minimizar a emissão de carbono por veículos leves, movidos a diesel e destinados a pequenos fretes, na cidade de Bristol. [11] Apresentaram uma análise multicritério, utilizando o termo ecoeficiência para avaliar o desempenho sustentável de veículos leves, incluindo critérios ambientais e econômicos.

[12] Mostraram que, para ônibus que trafegam em rotas de longa distância, como em rodovias, os níveis de HC, CO, MP e CO₂ são menores do que para ônibus urbanos. Na realidade isto ocorre porque os obstáculos oferecidos pelas edificações contribuem para o aprisionamento transitório dos poluentes dentro das vias. Como veículos de transporte coletivo intermunicipais partem de um PGV e necessitam circular inicialmente dentro da zona urbana, a utilização de rotas mais favoráveis, com menor emissão de substâncias, é justificável no contexto de mitigação da poluição nas cidades.

Neste contexto, o foco deste trabalho consiste na busca da rota ambiental para ônibus intermunicipais que partem de um PGV. O estudo foi aplicado para ônibus, movidos a diesel, originários do Terminal Rodoviário de Uberaba, MG, analisando rotas entre este PGV e a rodovia BR-050. Para quantificação dos fatores de emissão de poluentes foi aplicado o modelo computacional *Traffic Software Integrated System* (TSIS). Os resultados das emissões foram analisados segundo três critérios que serão apresentados a seguir. Entende-se que o termo Green Vehicle Routing Problem (G-VRP), utilizado na literatura por uma série de autores como [10], [13] e [14] pode induzir, a uma ideia de emissão de poluentes em zonas de campo aberto, o que, de fato, não ocorre para o tráfego de ônibus a diesel em zonas urbanas. Assim, este estudo utiliza o termo “rota ambiental” para definir o trajeto que é mais favorável em relação à mitigação das descargas de poluentes, durante o tempo de viagem dentro da cidade.

II. Material e métodos

Nesta seção são tratados o *software*, TSIS, e os métodos utilizados na pesquisa.

O *Traffic Software Integrated System* (TSIS) e seus fundamentos

O TSIS é um programa computacional comercial utilizado para análise de indicadores operacionais, como consumo de combustível, taxas médias de emissão veicular e condições de tráfego das vias urbanas e das rodovias, como velocidades e tempos de parada. O *Corridor Microscopic Simulation* (CORSIM) é o principal módulo do TSIS, o qual permite simular o movimento de veículos individuais, levando em conta o comportamento do motorista diante das condições topográficas do greide e da presença de sinalizações e semáforos. Para isso, o programa deve ser alimentado com informações das vias, tais como trajetos, tipos de veículos que nelas trafegam, sinalizações e semáforos. No caso, delinea-se previamente uma rede de tráfego, constituída por um conjunto de arcos – links – que representam graficamente os trechos das vias a serem analisadas. Os arcos são delimitados por nós que constituem pontos comuns a duas ou mais ligações. Para que sejam calculados os comprimentos e declividades dos trechos é fundamental que sejam informadas as coordenadas e as cotas altimétricas de todos os nós que constituem uma rede. Por isso, é importante dispor-se de um mapa planialtimétrico do local de abrangência da rota.

Após a criação da rota, também devem ser inseridos os atributos dos nós e dos arcos. No caso dos arcos, são informados: o volume de veículos que transitam pelo cruzamento ou interseção, programação dos semáforos, velocidade máxima permitida na via, largura e número de faixas.

A partir do cálculo das velocidades médias e dos tempos de parada do veículo em cada link, o TSIS simula o consumo de combustível e, conseqüentemente, as emissões de três tipos de poluentes atmosféricos: CO, HC e NO_x. Quando o objetivo é estimar as condições críticas de poluição, sugere-se simular horários de pico. Note-se que as estimativas das emissões podem variar em função das características locais de cada link, como as declividades de rampas, sinalizações e semáforos. Os fatores de emissão (FE) calculados pelo simulador computacional, originalmente são fornecidos em gramas por milha, mas podem ser transformados para gramas por quilômetro. Dessa maneira, de posse da extensão de um link, é possível quantificar a massa de poluente liberada no trecho. Conseqüentemente, a partir dos comprimentos acumulados dos links, calcula-se a massa total de poluente emitida pela rota.

Recorte espacial para aplicação do estudo

O estudo foi aplicado na cidade de Uberaba, MG, localizada na Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. Nesse contexto, consideraram-se vários trajetos de saídas dos ônibus intermunicipais e interestaduais, partindo do terminal rodoviário (PGV) até chegar à rodovia BR-050, principal via de saída dos itinerários vinculados ao Terminal Rodoviário de Uberaba.

A princípio, foram escolhidas as rotas mais viáveis para trajetos de ônibus entre o PGV e a rodovia BR-050. Essa pré-seleção levou em conta critérios como tráfego preferencial por avenidas, evitando-se vias estreitas e trajetos com mudanças muito frequentes de direção. Nesta etapa, o conhecimento prático do tráfego local também foi importante, pois isto evitou a escolha de trechos que historicamente apresentam eventos de congestionamentos recorrentes. Além disso, foram incluídas as rotas que atualmente são recomendadas como “as oficiais”. Essa filtragem inicial resultou em quatro rotas candidatas, as quais são ilustradas nas Figuras 1 e 2. Extensões: Rota 1 (2,85 km); Rota 2 (3,28 km); Rota 3 (3,62 km); Rota 4 (2,26 km).

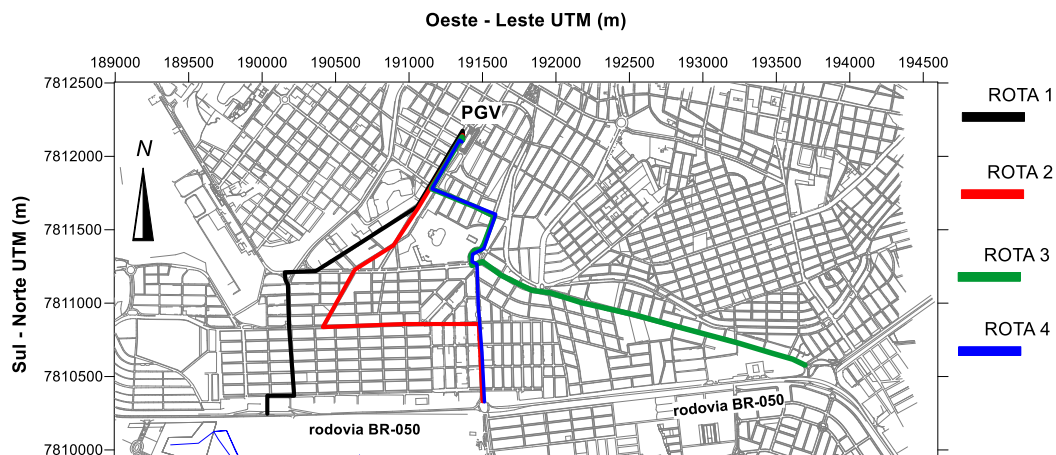


Figura 1: Traçado em planta das rotas pré-selecionadas sobre um sistema de coordenadas UTM.

Em uma breve análise dos traçados em planta e dos perfis verticais (greides), percebe-se que o problema expõe muito mais condicionantes do que a simples distância percorrida pelos veículos. Todas as rotas apresentam trechos de declive e aclive com extensões variadas. Em todos os casos, pelo menos os trechos iniciais são comuns, sendo que as Rotas 2 e 4 também apresentam os trechos finais coincidentes. Nota-se que a Rota 4, a mais curta, contém o mais longo trecho em aclive, ao passo que a Rota 1 apresenta um aclive acentuado, porém, seguido de um declive igualmente severo. As Rotas 2 e 3 são mais longas e, em geral, desenvolvem-se em aclives mais brandos do que as demais. Além disso, todas elas estão sujeitas a diferentes distribuições de sinalizações – como “Pare” e “Dê a Preferência” – e de semáforos. As paradas nos semáforos são dados importantes na simulação de tráfego, pois influenciam nos tempos de viagem pelas rotas. Assim, na Tabela 2 são apresentados os tempos de semáforo, cronometrados nos nós específicos de cada rota.

A partir do quadro de horários de embarque no Terminal Rodoviário de Uberaba, PGV cuja demanda chega a 165 viagens diárias, foram identificados os instantes de tráfego mais intenso. Dessa forma, verificaram-se dois momentos considerados como picos: às 06 horas, com 10 saídas, e às 12 horas, com 12 saídas. No TSIS, as simulações de tráfego foram implementadas para estes horários, com armazenamento dos resultados que resultaram nas maiores emissões por veículo.

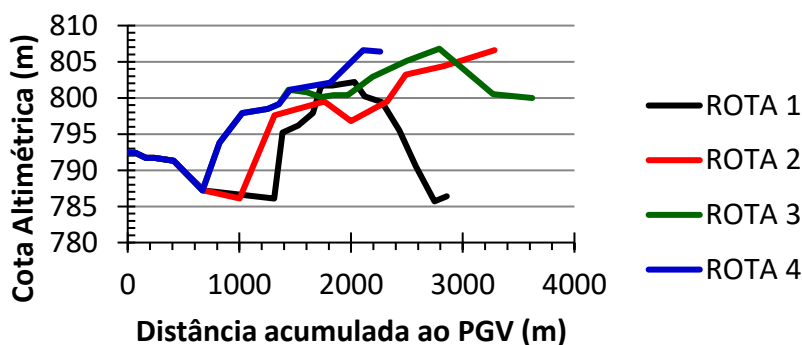


Figura 2: Greide das rotas pré-selecionadas.

Tabela 2: Tempos dos semáforos, em segundos, cronometrados nos respectivos nós de aplicação.

Rota 1	Rota 2	Rota 3	Rota 4
Semáforo nó 3 14 verde 3 amarelo 29 vermelho	Semáforo nó 3 14 verde 3 amarelo 29 vermelho	Semáforo nó 3 14 verde 3 amarelo 29 vermelho	Semáforo nó 3 14 verde 3 amarelo 29 vermelho
Semáforo nó 6 37 verde 3 amarelo 40 vermelho	Semáforo nó 6 37 verde 3 amarelo 40 vermelho	Semáforo nó 6 37 verde 3 amarelo 40 vermelho	Semáforo nó 6 37 verde 3 amarelo 40 vermelho
Semáforo nó 7 23 verde	Semáforo nó 7 23 verde	Semáforo nó 7 23 verde	Semáforo nó 7 23 verde

3 amarelo 54 vermelho	3 amarelo 54 vermelho	3 amarelo 54 vermelho	3 amarelo 54 vermelho
Semáforo nó 12 32 verde 3 amarelo 45 vermelho	Semáforo nó 10 28 verde 3 amarelo 45 vermelho	Semáforo nó 10 28 verde 3 amarelo 45 vermelho	Semáforo nó 10 28 verde 3 amarelo 45 vermelho
	Semáforo nó 15 23 verde 3 amarelo 54 vermelho	Semáforo nó 15 23 verde 3 amarelo 54 vermelho	Semáforo nó 15 36 verde 3 amarelo 40 vermelho
	Semáforo nó 16 36 verde 3 amarelo 40 vermelho	Semáforo nó 18 36 verde 3 amarelo 40 vermelho	
		Semáforo nó 21 36 verde 3 amarelo 40 vermelho	

Identificação da rota ambiental

Conforme comentado, as simulações pelo TSIS abrangem descargas veiculares dos gases CO, NOx e HC, sendo que tais emissões são quantificadas pelo fator de emissão (FE), inicialmente calculado em gramas por milha e convertido, a posteriori, em gramas por quilômetro. A diversidade dos trechos, incluindo suas peculiaridades geométricas e de tráfego, ocasiona emissões gasosas variáveis, as quais foram analisadas segundo os critérios propostos a seguir.

Critério das Menores Emissões Adimensionais (MeEA)

Nesta análise são identificados, para cada tipo de poluente, os trechos que apresentam os FE mais críticos. Trata-se de uma análise localizada, onde as rotas que apresentam trechos com maior emissão são preteridas em relação àquelas onde os FE são mais brandos. Os resultados são normalizados, levando em consideração o maior fator de emissão calculado em todas as rotas. Essa “adimensionalização”, que é feita de acordo com a Equação (1), permite comparar mais claramente as rotas pré-selecionadas, uma vez que identifica trechos cujas emissões se aproximam das máximas simuladas, além dos trechos com as menores emissões adimensionais (MeEA).

$$FE'_{k,i,j} = FE_{k,i,j} / FE_{k,máx} \quad (1)$$

Na Equação (1), k é o tipo de poluente analisado, enquanto j indica um trecho (link) de uma rota i. FE' é o fator de emissão adimensional, enquanto FE é o fator de emissão (ou gradiente de emissão), dado em gramas por quilômetro. FE_{k,máx} é o maior fator de emissão do poluente k, dentre todas as rotas analisadas.

Critério da Curva de Permanência de Emissões (CPE)

A curva de permanência de emissões (CPE) relaciona as liberações de poluentes com a probabilidade de ocorrerem FE com magnitudes iguais ou superiores a um determinado valor. Em outras palavras, a CPE define a disponibilidade das emissões no tempo de viagem pela rota. Os dados de base para a construção da CPE são as séries de fatores de emissão (FE), quantificados ao longo dos diferentes percursos. De posse desses valores, a CPE pode ser construída de acordo com os seguintes passos:

1) Estabelecimento de intervalos de classes de emissões:

$$d_{k,i} = (FE_{k,i,máx} - FE_{k,i,mín}) / (N - 1) \quad (2)$$

Na Equação (2), N é o número de intervalos de classe, dk,i é a amplitude de cada intervalo, enquanto FE_{k,i,máx} e FE_{k,i,mín} são, respectivamente, as maiores e menores emissões do poluente k, na rota i.

2) Cálculo da frequência (fn) de cada classe, contando-se o número de emissões da série que estão dentro de cada intervalo.

3) Cálculo dos valores de permanência (dn), acumulando-se os valores de fn no sentido da maior para a menor emissão. O somatório de fn deve ser igual ao número de dados da série de emissões.

4) Cálculo da probabilidade (Pn), em %, de uma emissão FE ser igual ou maior do que um valor FEn. Nesse caso, FEn representa a menor emissão de cada intervalo de classe:

$$P_n = (100 \cdot d_n) / \sum f_n \quad (3)$$

Os resultados fornecem pares de valores FEn (g/km) por Pn (%) que, dispostos em gráfico, formam a curva de permanência de emissões.

Critério das Massas Acumuladas (MAc)

Nem sempre a rota que apresenta o FE mais crítico é aquela que resulta na descarga de mais poluente. Dependendo da extensão, das condições topográficas e de tráfego, quando se considera a soma das massas de poluente, liberadas desde o PGV até o ponto final da viagem, a rota de maior emissão global pode não conter os trechos mais críticos. No contexto deste critério, a rota ambiental será considerada como aquela que libera a menor de massa de poluente, ao longo do comprimento acumulado dos seus N trechos, obedecendo, portanto, à seguinte função objetivo:

$$\min \sum_{j=1}^N (M_{k,j}) \quad (4)$$

III. Resultados

Nesta seção, são apresentados os resultados das análises multicriteriais que contribuíram para a escolha da rota ambiental. Os resultados são discutidos conforme os critérios de seleção descritos na Seção 2.

Rota ambiental critério da Menor pelo Emissão Adimensional (MeEA)

Os resultados dos fatores de emissão “adimensionalizados” (FE’), conforme a Equação (1), são ilustrados nas Figuras 3 a 5. As superposições desses fatores com o mapa da cidade permitem visualizações explícitas de qual trecho é o mais crítico para emissão de um determinado poluente, bem como da rota em que tais condições extremas ocorreram. Por outro lado, também é possível identificar as rotas com a maior incidência de trechos com baixa emissão.

Os resultados evidenciam que, para todos os poluentes, o gradiente de emissão crítico ocorre na Rota 4, em um trecho de 100 m, no contorno de uma rotatória com grande volume veicular na cidade. De uma maneira geral, a Rota 1 foi a que apresentou, ao longo dos seus trechos, menores fatores de emissão relativos.

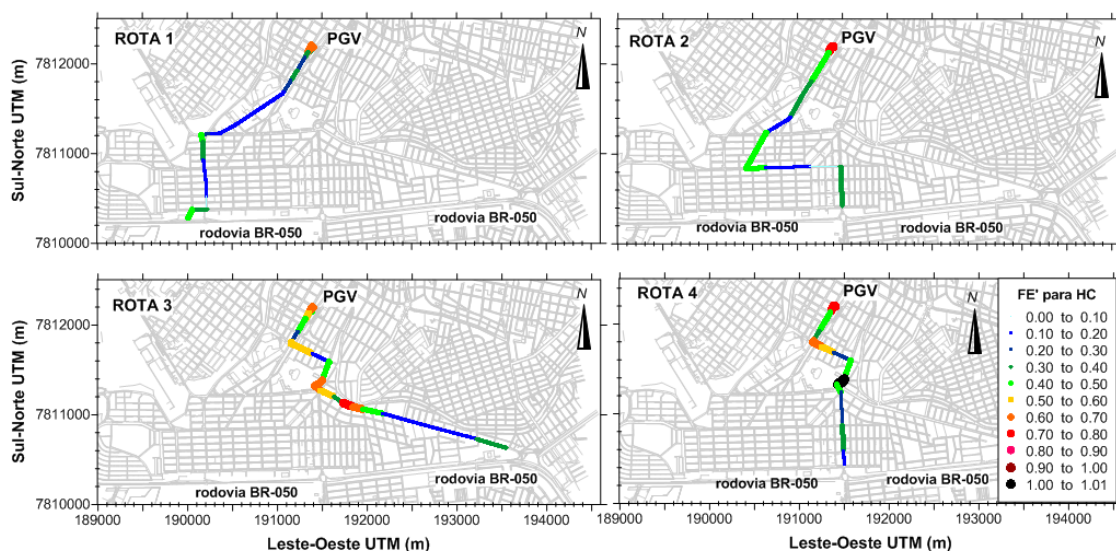


Figura 3: Fatores de emissão normalizados de HC: FEmáx= 5,4 g/km/veículo, na Rota 4.

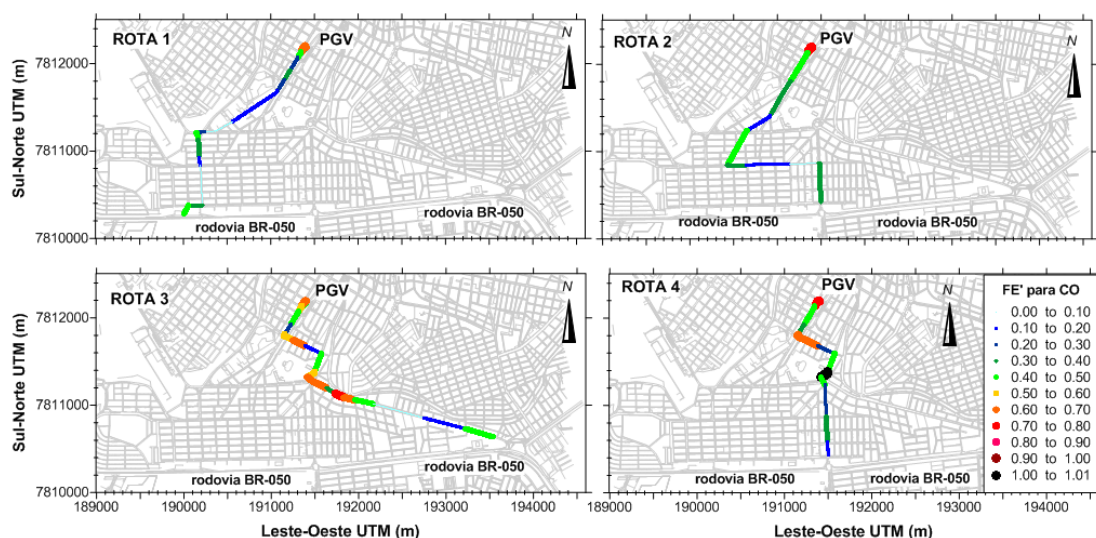


Figura 4: Fatores de emissão normalizados de CO: $FEmáx = 92,5$ g/km/veículo, na Rota 4.

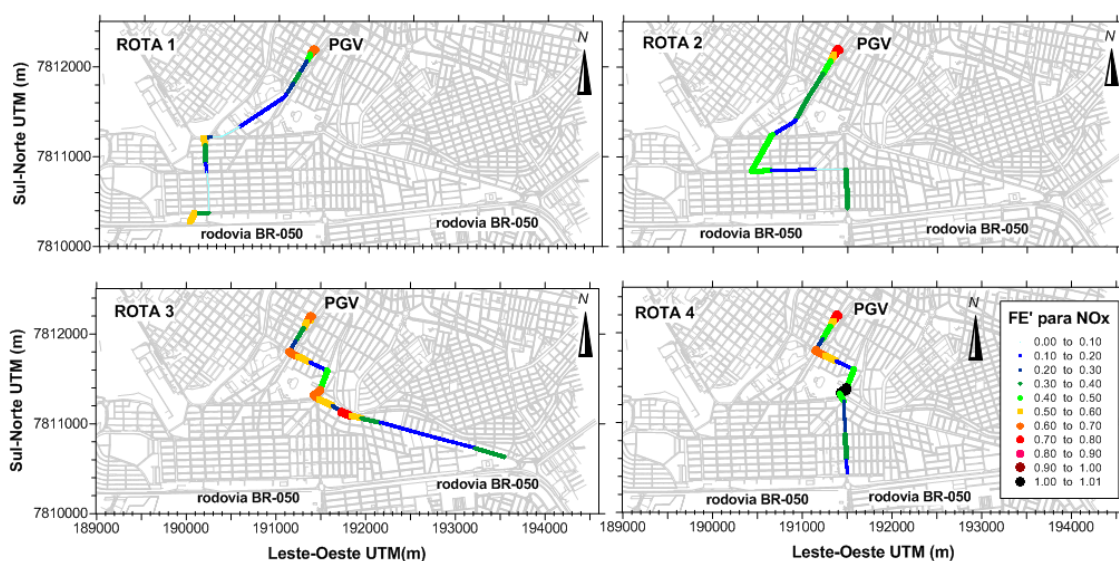


Figura 5: Fatores de emissão normalizados de NOx: $FEmáx = 14,0$ g/km/veículo, na Rota 4.

A apresentação dos resultados adimensionais em diagramas box-plot – Figura 6 – permite estabelecer comparações entre valores estatísticos representativos das rotas. Assim, nota-se que, embora a Rota 4 seja aquela onde ocorrem as maiores emissões localizadas, seus valores médios e limítrofes dos terceiros e primeiros quartis são inferiores aos da Rota 3, para todos os tipos de poluentes. Por outro lado, todos os limiares estatísticos conduzem, para a Rota 1, o título de rota ambiental. Dentre todas as outras, na Rota 1 verificaram-se os menores máximos, bem como as médias mais baixas, além dos menores patamares que limitam superiormente os primeiros e terceiros quartis.

Os resultados indicam que as Rotas 3 e 4 são as mais desfavoráveis, mas não são conclusivos sobre qual delas é a mais crítica. Enquanto a Rota 4 apresentou o trecho de maior descarga para os três poluentes analisados, a Rota 3 apresentou indicadores estatísticos também severos. No caso, para todos os poluentes, a Rota 3 revelou os maiores fatores de emissão médios, bem como os maiores patamares que limitam o primeiro e o terceiro quartil. A normalização das emissões indica que a Rota 3 tende a apresentar mais trechos com descargas elevadas. Por outro lado, os resultados são mais claros para o itinerário ambientalmente mais favorável. Nota-se que a Rota 1 foi a que evidenciou os indicadores estatísticos mais brandos, ou seja, os menores máximos, as menores médias e os menores limiares do primeiro e do terceiro quartil. Enfim, tomando por base exclusivamente critério MeEA, deduz-se que a Rota 1 é a rota ambiental selecionada.

Rota ambiental pelo critério da Curva de Permanência de Emissões (CPE)

As curvas de permanência de emissões (CPE) relacionam o fator de emissão de um determinado poluente com sua probabilidade de ocorrência ao longo do tempo de viagem do veículo. Por este critério, a rota ambiental

é considerada aquela cujas curvas conduzam aos menores fatores de emissão, para todos os tipos de poluentes analisados. No caso, será escolhida aquela rota cuja CPE se estabeleça abaixo das curvas das outras rotas, na maioria das faixas de permanência. Neste contexto, os resultados para os quatro itinerários pré-selecionados são apresentados nas Figuras 7 a 9.

Se a técnica das emissões adimensionais, descrita na Seção 2, alimentou dúvidas quanto ao percurso ambientalmente mais desfavorável, o critério da CPE indica que a Rota 4 é aquela que apresenta a maior probabilidade de liberar maiores descargas de poluentes. Nota-se que, para HC e CO, esta rota abrange os maiores FE para permanências de até 95% e que, para NOx, sua curva mantém-se acima das outras, para permanências de até 92%. No outro extremo, as curvas da Rota 1 permanecem inferiores às demais, em quase todas as faixas de permanência. Para este percurso, tomando como referência, por exemplo, o índice de 20%, os resultados revelam que há 20% de chance de ocorrerem emissões iguais ou superiores a 1,70 g/km, 28,50 g/km e 4,50 g/km para HC, CO e NOx, respectivamente. Ou seja, há 80% de probabilidade de que as emissões sejam inferiores a estes valores, durante todo o percurso do veículo pela Rota 1. Esses índices são ambientalmente mais favoráveis quando

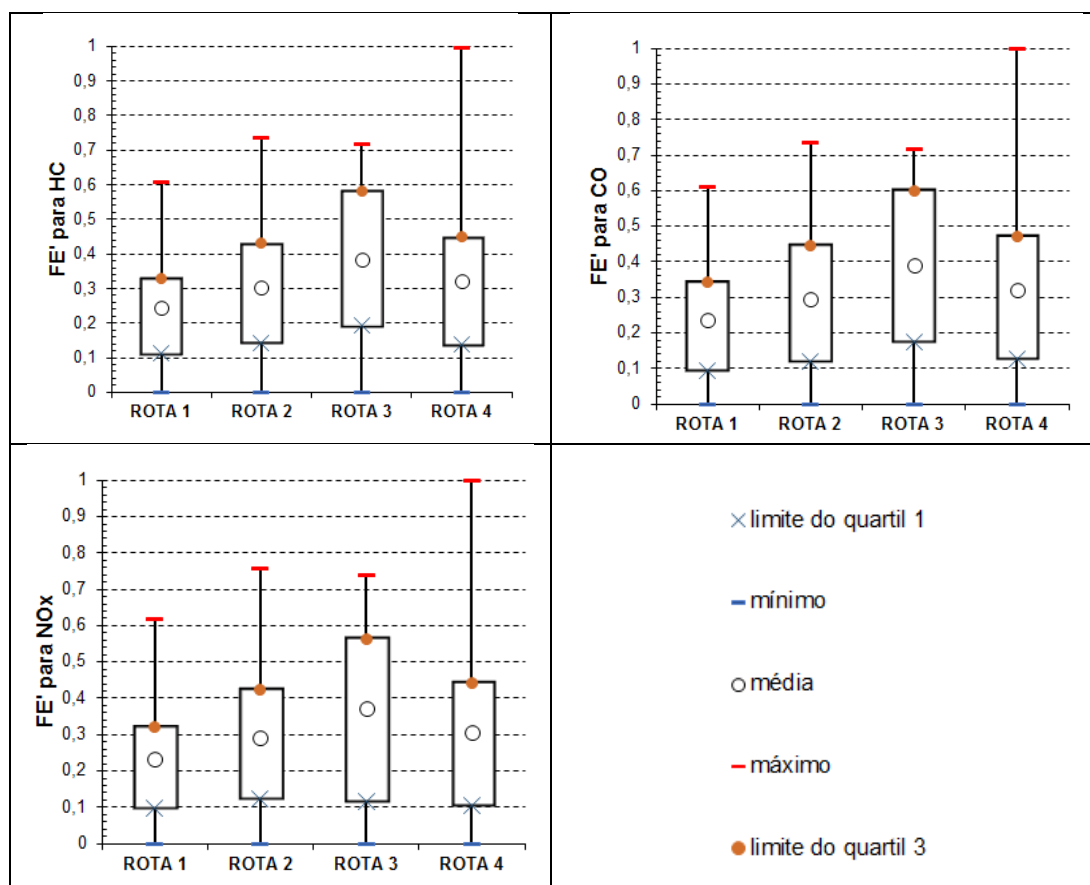


Figura 6: Diagramas *box-plot* para os fatores de emissão normalizados.

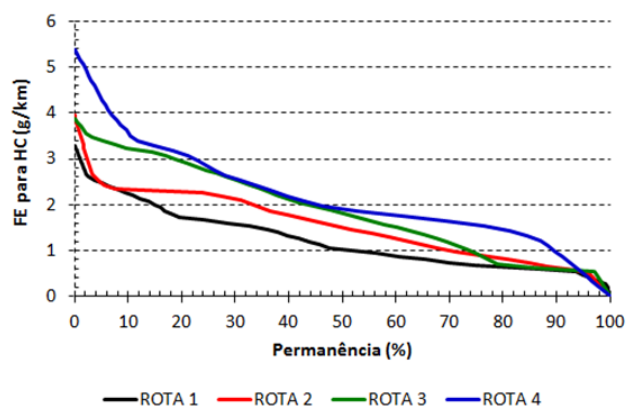


Figura 7: Curvas de Permanência de Emissões para hidrocarbonetos (HC).

confrontados, por exemplo, com os das Rotas 2, 3 e 4, cujos fatores de emissão são maiores para esta mesma faixa de permanência. Em suma, o critério da CPE corrobora que a Rota 1 deve ser o itinerário ambientalmente mais favorável para o problema.

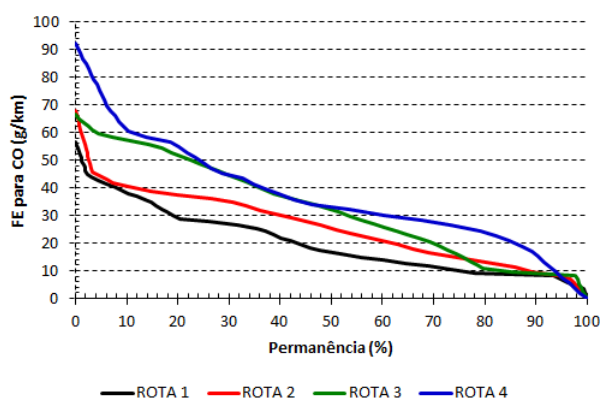


Figura 8: Curvas de Permanência de Emissões para monóxido de carbono (CO).

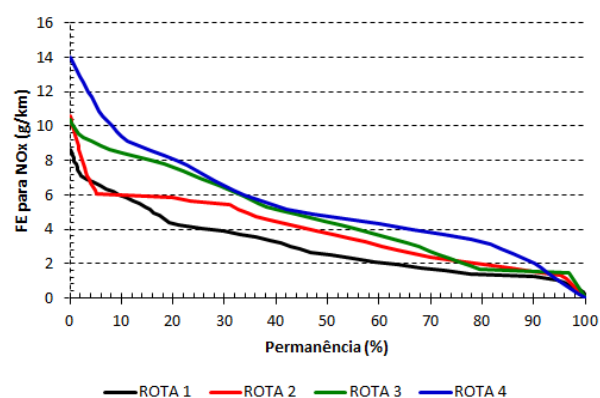


Figura 9: Curvas de Permanência de Emissões para óxidos de nitrogênio (NO_x).

Rota ambiental pelo critério das Massas Acumuladas (MAC)

Ao contrário do critério MeEA e, de maneira mais genérica que o critério da CPE, o método das Massas Acumuladas (MAC) não seleciona a rota mais favorável com base nos aspectos locais dos trechos, mas sim a partir de um indicador global e objetivo: a massa total de gases que foi liberada desde o PGV até o ponto final do percurso. Partindo-se deste conceito, a rota ambiental será aquela que liberar as menores massas de poluentes para a atmosfera, considerando a totalidade do seu percurso. Nesse sentido, as massas de poluentes, descarregadas por um único ônibus e acumuladas em relação à distância ao PGV, são apresentadas nas Figuras 10 a 12.

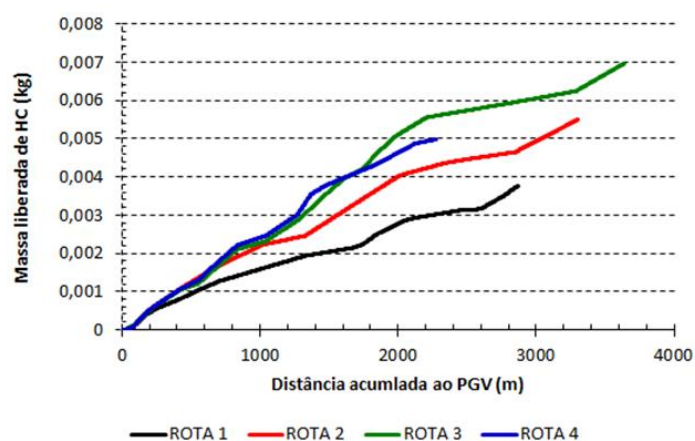


Figura 10: Curvas de Massas Acumuladas para hidrocarbonetos (HC).

Os diagramas de MAC indicam libera es de poluentes relativamente similares para as Rotas 3 e 4. Contrariando o critério da CPE, aqui percebe-se que o percurso ambientalmente mais desfavorável ocorre pela Rota 3, em cujo fim da viagem, o veículo liberou as maiores massas acumuladas para todos os três poluentes analisados.   verdade que o fato desta rota ser a mais longa contribuiu para as maiores libera es globais, todavia, seus gradientes de emissão, apesar de serem equiparados aos da Rota 4, são muito superiores aos das Rotas 2 e 1. No outro extremo, os diagramas revelam claramente que a Rota 1   a que descarrega as menores massas de poluentes para a atmosfera sendo,   luz deste critério, considerada a rota ambiental selecionada. Nesta questão, o critério MAC vem confirmar as previsões dos demais critérios.

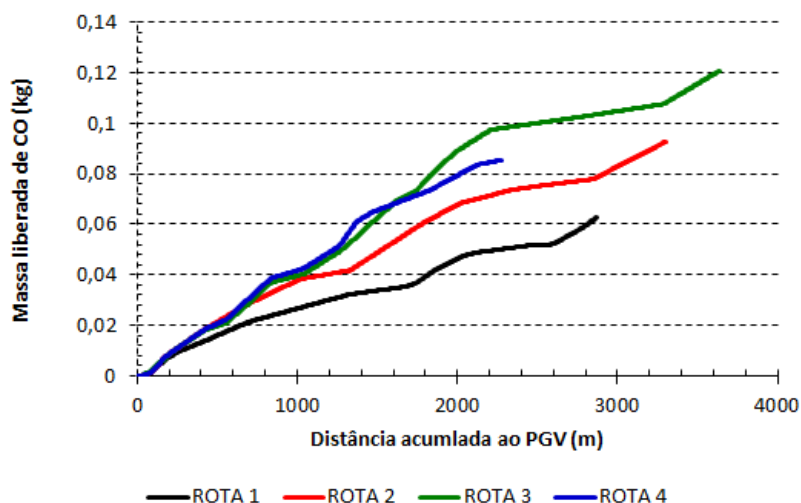


Figura 11: Curvas de Massas Acumuladas para monóxido de carbono (CO).

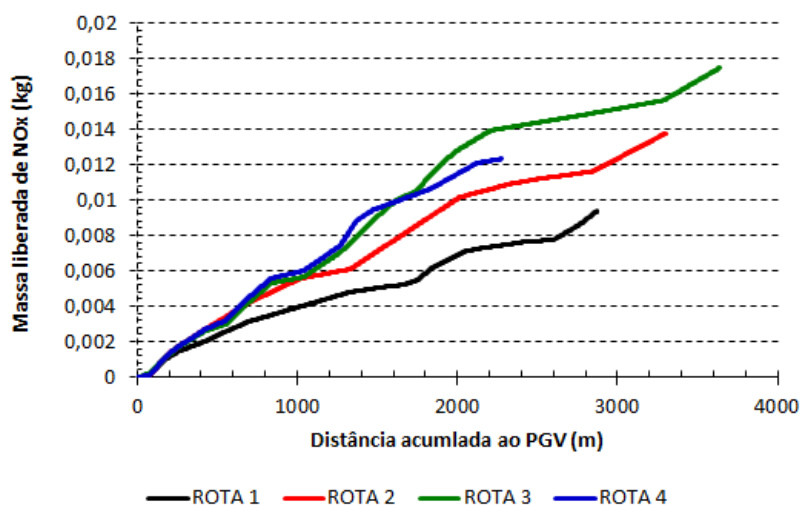


Figura 12: Curvas de Massas Acumuladas para óxidos de nitrogênio (NO_x).

IV. Conclusões

Este estudo baseou-se na simula o das emissões veiculares de três compostos considerados prejudiciais   saúde do ser humano (HC, CO e NO_x). Com base na análise multicritério aplicada para ônibus intermunicipais que partem do Terminal Rodoviário de Uberaba, MG chegou-se   conclusão de que o percurso mais favorável, em termos ambientais, foi a Rota 1. Sua sele o foi confirmada por todos os três critérios apresentados neste trabalho. No caso específico deste problema e de sua delimita o espacial, os resultados simulados pelo TSIS indicaram que a Rota 1 apresenta trechos com os menores fatores de emissão dimensionais, curvas de permanência de emissões mais brandas e a menor libera o de massa acumulada. Os resultados indicaram que a menor emissão de poluentes, por veículo, não esteve estritamente relacionada com a distância, pois a Rota 1 não foi a menor em extensão. O fato   que, nos horários de pico considerados, as condi es de tráfego para a Rota 1 foram mais favoráveis. Dentre todas, a Rota 1 apresentou menos pontos de parada, como semáforos e sinais de

“Pare” e “D  a Preferência”, sendo que isto contribuiu para maior fluidez do tráfego. Atualmente, os veículos que partem do Terminal Rodoviário de Uberaba, com destino   rodovia BR-050, utilizam as Rotas 3 e 4, tomadas como oficiais pela secretaria municipal de trânsito. Os indicadores desta pesquisa revelaram que tais rotas são ambientalmente desfavoráveis.

As simula es aqui conduzidas basearam-se em dados que podem ser facilmente obtidos, como curvas de nível, vias trafegadas pelos veículos, sinaliza es de trânsito, tempos de semáforos, horários de partida da frota e tipos de poluentes emitidos. Tais dados estão disponíveis ou podem ser levantados na maioria das cidades do país. Além disto, os três cr terios utilizados demandam cálculos que podem ser diretamente realizados em planilhas eletr nicas. Fatores como estes destacam o potencial de aplica o prático da metodologia.

De uma forma geral, quando o estudo   aplicado em etapas de planejamento, podem-se tomar decisões acerca da implanta o de terminais rodoviários em áreas mais adequadas e rotas de saída com menores impactos ambientais, onde as emissões de gases sejam mitigadas. Num contexto mais amplo, isto pode contribuir para atenua o dos problemas de saúde causados por alguns poluentes expelidos pelas paradas e movimenta o da frota de ônibus intermunicipais.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq,   CAPES,   FAPEMIG,  rg os brasileiros de fomento   pesquisa e   Universidade de Uberaba.

Referências

- [1]. Instituto De Pesquisa Econ mica E Aplicada (Ipea) (2011). Polui o Veicular Atmosférica. Comunicados Ipea, N. 113. Brasília, Df.
- [2]. Carvalho, C. H. R. (2011). Emissões Relativas De Poluentes Do Transporte Motorizado De Passageiros Nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros. Instituto De Pesquisa Econ mica E Aplicada (Ipea), N. 1606, Brasília.
- [3]. Basaga a, X.; Triguero-Mas, M.; Agisi, D.; Péres, N.; Reche, C.; Alastury, A.; Querol, X. (2018). Effect Of Public Transport Strikes On Air Pollution Levels In Barcelona (Spain). *Science Of The Total Environment*, V. 610-611, P. 2076-2082.
- [4]. Corfa, E.; Maury, F.; Segers, P.; Fresneau, A.; Albergel, A. (2004). Short-Range Evaluation Of Air Pollution Near Bus And Railway Stations. *Science Of The Total Environment*, V. 334-335, P. 223-230. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.04.077>.
- [5]. Hertel, O.; Hvidberg, M.; Ketzel, M.; Storm, L.; Stausgaard, L. (2008). A Proper Choice Of Route Significantly Reduces Air Pollution Exposure – A Study On Bicycle And Bus Trips In Urban Streets. *Science Of The Total Environment*, V. 389, P. 58-70. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.04.077>.
- [6]. Liu, L. J. S.; Phuleria, H. C.; Webber, W.; Davey, M.; Lawson, D. R.; Ireson, R. G.; Zielinska, B.; Ondov, J. M.; Weaver, C. S.; Lapin, C. A.; Easter, M.; Hesterberg, T. W.; Larson, T. (2010). Quantification Of Self Pollution From Two Diesel School Buses Using Three Independent Methods. *Atmospheric Environment*, V. 44, P. 3422-3431. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.005>.
- [7]. Jiménez, F.; Román, A. (2016). Urban Bus Fleet-To-Route Assignment For Pollutant Emissions Minimization. *Transportation Research Part E*, V. 85, P. 120-131.
- [8]. Turkensteen, M. (2017). The Accuracy Of Carbon Emission And Fuel Consumption Computations In Green Vehicle Routing. *European Journal Of Operational Research*, V. 262, P. 647-659.
- [9]. Androustopoulos, K. N.; Zografos, G. K. (2017). An Integrated Modelling Approach For The Bicriterion Vehicle Routing And Scheduling Problem With Environmental Considerations. *Transport Research Part C*, V. 82, P. 180-209.
- [10]. Costa, P. R. De O.; Mauceri, S.; Carroll, P.; Pallonetto, F. (2018). A Genetic Algorithm For A Green Vehicle Routing Problem. *Electronic Notes In Discrete Mathematics*, V. 64, P. 65-74.
- [11]. Caiado, R. G. G.; Sim o, V. G.; Rangel, L. A. D.; Quelhas, O. L. G.; Lima, G. B. A. (2018). Análise Multicrit rio Da Ecoefici ncia Do Transporte De Cargas Com Veículos Leves. *Transportes*, V. 26, N. 1, P. 21-36. Doi: <https://doi.org/10.14295/Transportes.V26i1.1313>.
- [12]. Hsu, D. J.; Huang, H. L. (2009). Concentrations Of Volatile Organic Compounds, Carbon Monoxide, Carbon Dioxide And Particulate Matter In Buses On Highways In Taiwan. *Atmospheric Environment*, V. 43, P. 5723-5730. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.08.039>.
- [13]. Erdoĝan, S.; Miller-Hooks, E. (2012). A Green Vehicle Routing Problem. *Transportation Research Part E*, V. 48, P. 100-114. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.08.001>.
- [14]. Lin, C.; Choy, K. L.; Ho, G. T. S.; Chung, S. H.; Lam, C. H. Y. (2014). Survey Of Green Vehicle Routing Problem: Past And Future Trends. *Expert Systems With Applications*, V. 41, N. 4, P. 1118-1138. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.107>.