

## X-013 - APLICAÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO DE FONTES LINEARES CALINE4 NO BAIRRO DE BANGU, RIO DE JANEIRO

**Ricardo Araújo Lessa<sup>(1)</sup>**

Bacharel em Geografia pela Universidade Federal Fluminense. Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Geógrafo e Gerente de Projetos pela Golder Associates.

**Eduardo Monteiro Martins<sup>(1)</sup>**

D.Sc. em Físico Química pela UFRJ. Professor Adjunto do Depto. de Eng. Sanitária e do Meio Ambiente – Faculdade de Engenharia – UERJ

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua São Francisco Xavier – 524 - Maracanã – Rio de Janeiro - RJ - CEP: 20550-900 - Brasil - Tel: (21) 2334-0512. e-mail: riclessa@yahoo.com.br

### RESUMO

A poluição urbana atmosférica é um sério problema ambiental e de saúde em diversos centros urbanos. No Brasil, as concentrações de alguns poluentes atmosféricos têm crescido a despeito das ações adotadas para minimização das emissões. Isso ocorre principalmente devido ao crescente número de veículos automotivos de combustão interna em circulação nas vias.

Para se avaliar adequadamente o comportamento dos poluentes emitidos por veículos automotores na atmosfera, é necessária uma gama de ações gerencialmente relacionáveis, tais como monitorar as concentrações dos poluentes na atmosfera, analisar a evolução da qualidade do ar; conhecer o comportamento da frota veicular e seu fluxo diário, além das suas emissões e; realizar estudos de inventário, modelagens de dispersão com o intuito de avaliar o real comportamento e origem dos poluentes que afetam a qualidade do ar e os alcances geográficos.

Este estudo visou realizar a modelagem de dispersão dos poluentes e avaliar o desempenho do modelo CALINE4 quanto aos resultados previstos para CO e NO<sub>2</sub> quando comparados aos resultados observados pela estação de monitoramento da qualidade do ar, por meio de um estudo de caso em uma microrregião inserida em Bangu, bairro localizado na Zona Oeste da cidade Rio de Janeiro e na Bacia Área III da Região Metropolitana do Rio de Janeiro.

**PALAVRAS-CHAVE:** Poluição veicular, Estudo de dispersão, Modelagem numérica, Monóxido de carbono; Dióxido de nitrogênio, CALINE4.

### INTRODUÇÃO

A degradação da qualidade do ar não é um fenômeno novo e exclusivo dos dias atuais. O modo de vida desenvolvido pelo homem através dos séculos tem como consequência a geração de partículas, aerossóis e gases considerados como poluentes atmosféricos. Nas últimas décadas, entretanto, o número de veículos circulando pelas ruas das grandes cidades tem ocasionado episódios recorrentes de má qualidade do ar.

A poluição do ar originada a partir dos escapamentos dos veículos automotores é um dos mais graves problemas relativos à degradação da qualidade ambiental em áreas urbanas. Diversas são as substâncias emitidas, dentre elas, algumas tóxicas e capazes de causar danos sobre o meio ambiente e sobre a saúde humana, como doenças cardiorrespiratórias, alergias, irritações das vias respiratórias e até desenvolvimento de câncer e aumento das taxas de mortalidade (RIBEIRO, 2011; TACO, 2006; USEPA, 2013).

Ao redor do mundo muitos estudos têm sido realizados de acordo com o contexto explicado acima: modelagens de dispersão de poluentes atmosféricos emitidos por veículos automotores, através de uma ampla gama de modelos disponíveis, e a comparação dos resultados de concentração observada ( $C_O$ ) pelas estações de monitoramento e resultados de concentração prevista ( $C_P$ ) pelos modelos de dispersão. Os resultados obtidos servem tanto para uma avaliação mais detalhada da contribuição das emissões veiculares para a qualidade do ar urbana quanto para um *feedback* das performances dos modelos, que vêm sofrendo constantes melhorias com a finalidade de compreender e englobar os parâmetros físicos e ambientais do mundo real.

O modelo de dispersão CALINE4 é a quarta versão da série *California Line Source* desenvolvida pelo Departamento de Transporte da Califórnia (CALTRANS) e considera, de uma forma mais simplificada nos seus parâmetros de entrada, que a emissão dos poluentes se dá através de uma fonte linear finita, que se dispersam segundo a distribuição Gaussiana em estado estacionário e emprega o conceito de Zona de Mistura Inicial (BENSON, 1989, WASHINGTON et. al, 1994).

Os poluentes atmosféricos que sofreram processo de dispersão neste trabalho foram o monóxido de carbono (CO) e o dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>).

Os resultados obtidos são as concentrações previstas (C<sub>P</sub>) pelo modelo CALINE4 para ambos os poluentes acima citados. Esses resultados foram, em uma próxima etapa, comparados às concentrações observadas (C<sub>O</sub>) para os mesmos poluentes obtidas pela estação de monitoramento da qualidade do ar operada pela Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (SMAC, 2014).

Também foi realizada uma Análise de Sensibilidade do modelo por meio de modificações em um parâmetro de entrada.

Para avaliação da eficiência do modelo, utilizou-se do método estatístico denominado *Fractional Bias* (USEPA, 1992). Posteriormente, foi realizada uma análise de sensibilidade do modelo por meio de modificações de parâmetros importantes com fins de avaliação das respostas geradas pelo modelo.

Os resultados obtidos apontaram uma tendência geral de previsão subestimada das concentrações dos poluentes por parte do modelo CALINE4.

O desenvolvimento deste trabalho contou com o apoio da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro e da Secretaria Municipal de Meio Ambiente que cederam os dados de monitoramento de qualidade do ar estação da estação localizada no bairro de Bangu.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização deste trabalho, foram utilizados os seguintes materiais e métodos:

Como principal ferramenta foi utilizado o modelo de dispersão CALINE4 da série *California Line Source* desenvolvida pelo Departamento de Transporte da Califórnia. O modelo CALINE4 utilizado neste estudo é o de versão 2.1, com última atualização em outubro de 2011.

O CALINE4 é um modelo que requer entrada de dados de modo mais simplificado que os demais modelos similares, principalmente no item relativo às informações meteorológicas. As entradas necessárias podem ser divididas em cinco classes, a saber: parâmetros gerais, condições meteorológicas, condições da modelagem, geometria das vias, atividades das vias, posição dos pontos receptores.

Desses parâmetros, os dados necessários às condições meteorológicas foram adquiridos junto à Secretaria Municipal de Meio Ambiente do Rio de Janeiro (SMAC, 2014). Os fatores de emissão foram desenvolvidos através do método *bottom-up* descrito pela CETESB (2013).

A atividade veicular nas vias de entorno da estação de monitoramento foi obtida por meio de contagem manual abreviada (ANJANEYULU et al., 2006; CETSP, 1981; KENTY et al., 2007), durante quatro visitas a campo no bairro de Bangu.

A geometria das vias foi verificada durante visitas a campo, com utilização de imagens de satélite e aparelhos GPS.

Os dados de concentrações observadas dos poluentes CO e NO<sub>2</sub> foram obtidos também adquiridos junto à Secretaria Municipal de Meio Ambiente do Rio de Janeiro (SMAC, 2014). Tais dados deram subsídio para as premissas de concentrações de *background* dos poluentes.

Para a avaliação da eficiência do modelo CALINE4, utilizou-se dos métodos estatísticos desenvolvidos e descritos pela agência ambiental norte-americana em seu estudo de determinação de modelos com melhores performances, denominado método *Fractional Bias* (USEPA, 1992). Esse método é o ideal para essa avaliação, que é definido pela expressão geral apresentada na Equação 1.

$$FB = 2 \left[ \frac{C_O - C_P}{C_P + C_O} \right] \quad \text{Equação 1.}$$

O *Fractional Bias* é aconselhado por apresentar resultados e gráficos de rápida interpretação pelo fato de serem simétricos e limitados, pois o alcance dos resultados varia entre -2,0, que representa um valor extremamente superestimado pela previsão, e +2,0, que representa um valor extremamente subestimado pela previsão do modelo. Além disso, o método é adimensional, o que é conveniente para fins de comparação de resultados de concentrações distintas de diferentes poluentes. Desse modo, os valores ideais são aqueles próximos a zero.

De acordo com a USEPA (1992), os resultados aceitos como razoáveis tendem a se enquadrarem de -0,67 (resultado superestimado por um fator de duas vezes) a +0,67 (resultado subestimado por um fator de duas vezes).

Por fim, este trabalho realizou uma análise de sensibilidade através de modificação em um dos parâmetros de entrada, a saber: volume da atividade tráfego nas vias selecionadas para o estudo. Os resultados em termos de concentração prevista foram também avaliados pelo método *Fractional Bias*.

## AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE MONÓXIDO DE CARBONO

As simulações de dispersão foram realizadas com o poluentes monóxido de carbono (CO) para um total de cinco dias pertencentes aos meses de agosto de setembro de 2013, no período das 07 h às 20 h. Esses cinco dias foram escolhidos de maneira a conduzir a simulação de acordo com os critérios estabelecidos pelo próprio modelo e também para se aproximarem das características meteorológicas e de tráfego veicular dos dias de realização da contagem manual dos veículos. Desse modo, os dias contemplados são dias de semana e com ausência de efeitos meteorológicos adversos à simulação (i.e.: entrada de sistema frontal, precipitação e ventos fortes).

As simulações do poluente monóxido de carbono obtiveram um desempenho aparentemente razoável ao se verificar a relação concentração prevista ( $C_P$ ) e concentração observada ( $C_O$ ) sem análises mais profundas.

Das 65 simulações de dispersão realizadas, 33 obtiveram resultados FB entre 0,67 e -0,67. Esse total representa 50,8% de simulações com desempenho razoável. Das 32 demais simulações que tiveram resultados ruins, 29 apresentaram-se subestimadas (i.e.: FB maior que 0,67) e somente três apresentaram concentrações superestimadas (i.e.: FB abaixo de -0,67).

Na Figura 1 é possível visualizar a comparação entre os valores modelados e os valores monitorados para cada horário de acordo com a distribuição relativa ao FB descrita acima com maioria das simulações com FB maiores que 0,00, ou seja, subestimativas, de um modo geral.

Além disso, das 33 simulações consideradas como “razoáveis”, de acordo com os critérios da USEPA, 24 são resultados de “levemente” subestimados, isto é, FB entre 0 e 0,67 e 7 são resultados “levemente” superestimados, ou seja, FB entre 0 e -0,67. As outras duas simulações obtiveram (aparentemente) o resultado ideal, isto é, FB igual a zero.

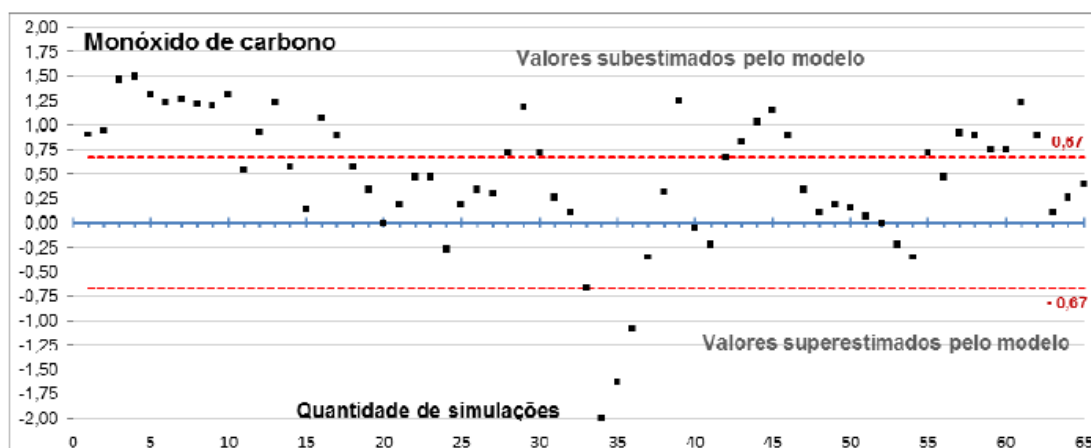


Figura 1: Resultados de comparação  $C_p$ - $C_o$  por meio de FB para monóxido de carbono.

## AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE DIÓXIDO DE NITROGÊNIO

As simulações de dispersão foram realizadas com o poluente dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ) para um total de cinco dias pertencentes aos meses de agosto de setembro de 2013, no período das 07 h às 20 h. Esses cinco dias foram escolhidos de maneira a conduzir a simulação de acordo com os critérios estabelecidos pelo próprio modelo e também para se aproximarem das características meteorológicas e de tráfego veicular dos dias de realização da contagem manual dos veículos. Desse modo, os dias contemplados são dias de semana e com ausência de efeitos meteorológicos adversos à simulação (i.e.: entrada de sistema frontal, precipitação e ventos fortes).

Assim como o poluente monóxido de carbono, as simulações do poluente dióxido de nitrogênio obtiveram um desempenho aparentemente razoável ao se verificar a relação concentração prevista ( $C_p$ ) e concentração observada ( $C_o$ ) sem análises mais profundas.

Das 65 simulações de dispersão realizadas, 35 obtiveram resultados FB entre -0,67 e 0,67. Esse total representa 53,8% de simulações com desempenho razoável. Das 30 demais simulações que tiveram resultados ruins, todas se apresentaram subestimadas, isto é, FB maior que 0,67.

Na Figura 2 é possível visualizar a comparação entre os valores modelados e os valores monitorados para cada horário de acordo com a distribuição relativa ao FB descrita acima com maioria das simulações com FB maiores que 0,00, ou seja, subestimativas, de um modo geral.

É possível verificar que o modelo apresentou resultados ( $C_p$ ) subestimados (FB acima de 0,00) para quase todas as simulações de dispersão de  $\text{NO}_2$  realizadas. Apenas dois resultados das simulações ficaram abaixo da linha de 0,00 FB, ou seja, predições acima da concentração observada pela estação. Das 35 simulações consideradas como “razoáveis”, de acordo com os critérios da USEPA (1992), 33 são resultados de “levemente” subestimados, isto é, FB entre 0 e 0,67 e 2 são resultados “levemente” superestimados, ou seja, FB entre 0 e -0,67. Não ocorreram simulações com resultado ideal, no qual FB é igual a zero, quando a  $C_p$  é igual à  $C_o$ .

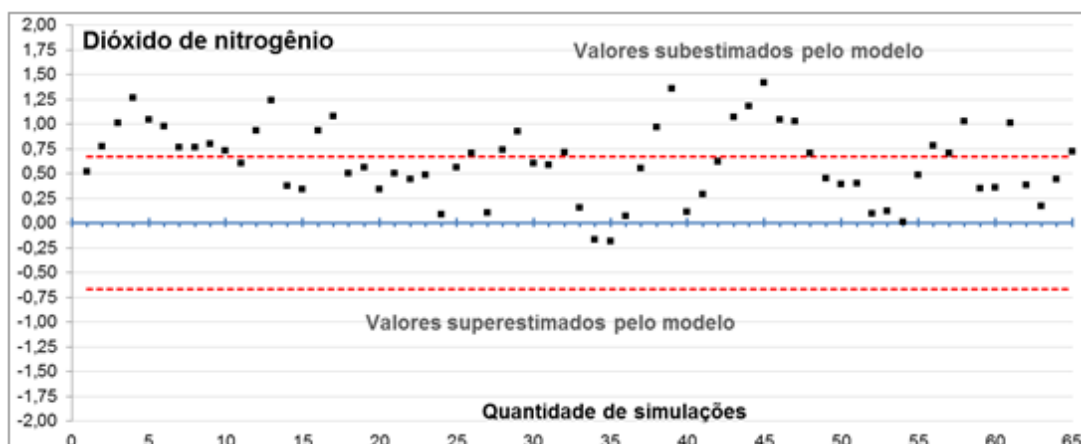


Figura 2: Resultados de comparação  $C_P$ - $C_0$  por meio de FB para dióxido de nitrogênio.

### AVALIAÇÃO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO

Para a análise de sensibilidade das respostas em concentrações previstas pelo modelo CALINE4, este trabalho considerou um volume de atividade veicular oito vezes maior sobre as vias analisadas, que sofreram o processo de contagem veicular.

As simulações de dispersão do poluente monóxido de carbono (CO) obtiveram um desempenho aparentemente razoável e sensivelmente melhor do que as simulações com tráfego normal. Das 65 simulações de dispersão realizadas, 42 obtiveram resultados FB entre 0,67 e -0,67. Esse total representa 64,6% de simulações com desempenho razoável, contra 50,8% das simulações anteriores.

Das 23 demais simulações que tiveram resultados ruins, 17 apresentaram-se subestimadas (i.e.: FB maior que 0,67) e 6 apresentaram concentrações superestimadas (i.e.: FB abaixo de -0,67). Com o aumento da atividade veicular não foi mais verificada a grande tendência de subestimação do CO por parte do CALINE4.

Das 42 simulações consideradas como “razoáveis”, de acordo com os critérios da USEPA (1992), 26 são resultados de “levemente” subestimados, isto é, FB entre 0 e 0,67 e 15 são resultados “levemente” superestimados, ou seja, FB entre 0 e -0,67. Uma simulação obteve (aparentemente) o resultado ideal, isto é, FB igual a zero.

Na Figura 3 é possível visualizar a comparação entre os valores modelados e os valores monitorados para cada horário de acordo com a distribuição relativa ao FB para os exercícios de análise de sensibilidade para o poluente monóxido de carbono.

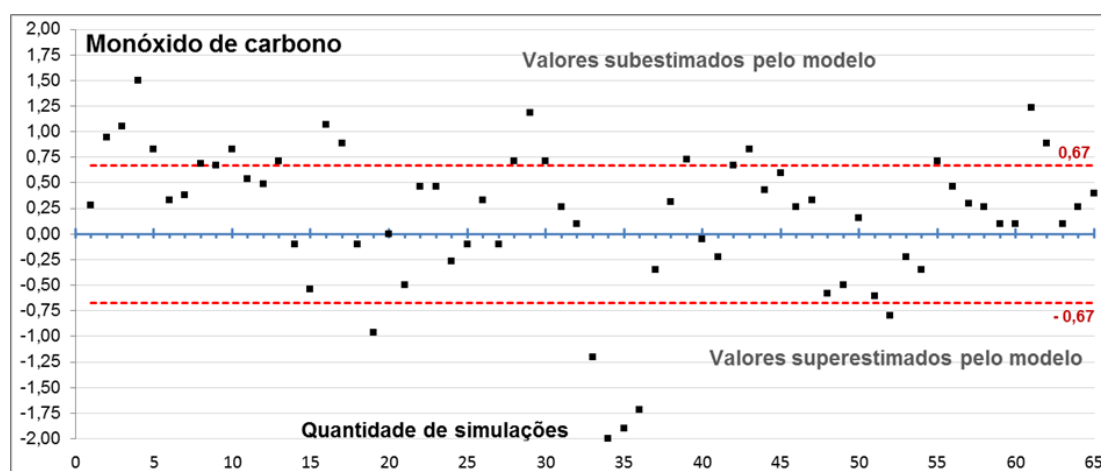
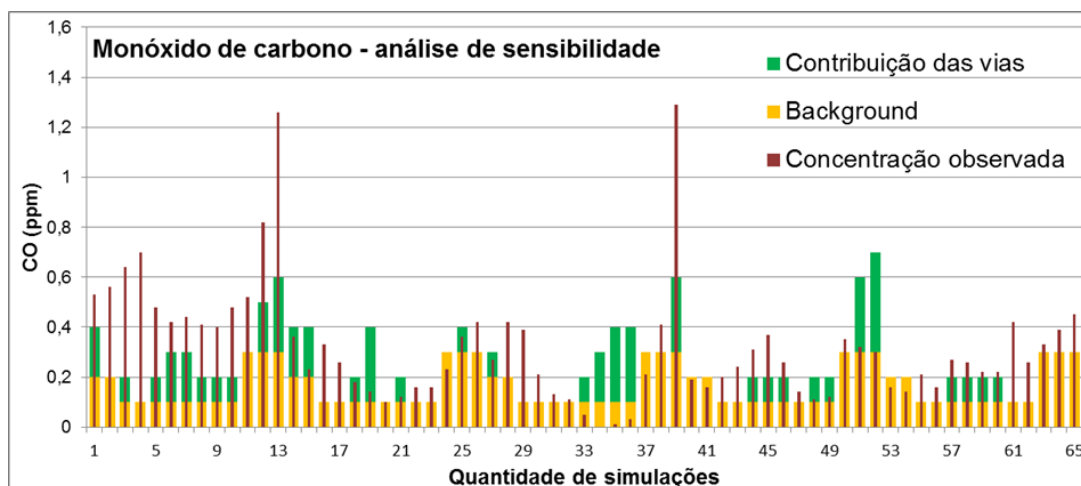


Figura 3: Resultados da comparação  $C_P$ - $C_0$  por meio de FB na análise de sensibilidade para monóxido de carbono.

Ao analisar a relação da contribuição de monóxido de carbono (i.e.: CP - *background*) das vias sobre o ponto receptor, pode-se constatar que, dessa vez, as contribuições nulas ocorreram em 32 simulações, a despeito das 65 anteriores. Com isso, a média das contribuições foi de 0,085 ppm CO para cada simulação horária. A Figura 4 mostra a relação entre as concentrações das contribuições e do background (que somados perfazem a concentração prevista pelo modelo) e a concentração observada pela estação de monitoramento.

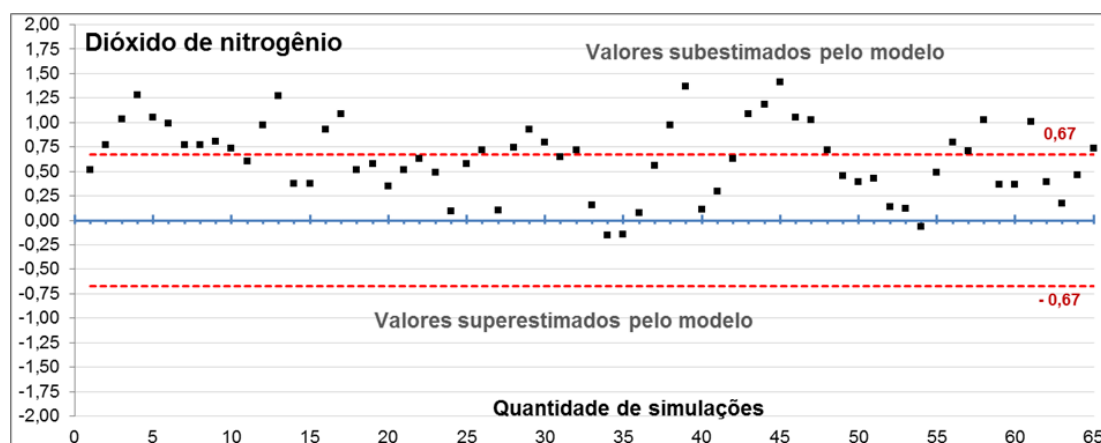


**Figura 4: Relação das concentrações de *background*, contribuição das vias e concentração observada na análise de sensibilidade para monóxido de carbono.**

Para a análise de sensibilidade, as simulações de dispersão do poluente dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) obtiveram um desempenho sensivelmente menos eficazes do que as simulações com tráfego normal, ao contrário do ocorrido com o monóxido de carbono.

Das 65 simulações de dispersão realizadas, 34 obtiveram resultados FB entre 0,67 e -0,67. Esse total representa 52% de simulações com desempenho razoável, contra 53,8% das simulações anteriores em condições normais de frota. Das 31 demais simulações que tiveram resultados ruins, todas se apresentaram subestimadas (i.e.: FB maior que 0,67).

Na Figura 5 é possível visualizar a comparação entre os valores modelados e os valores monitorados para cada horário de acordo com a distribuição relativa ao FB para os exercícios de análise de sensibilidade para o poluente dióxido de nitrogênio.

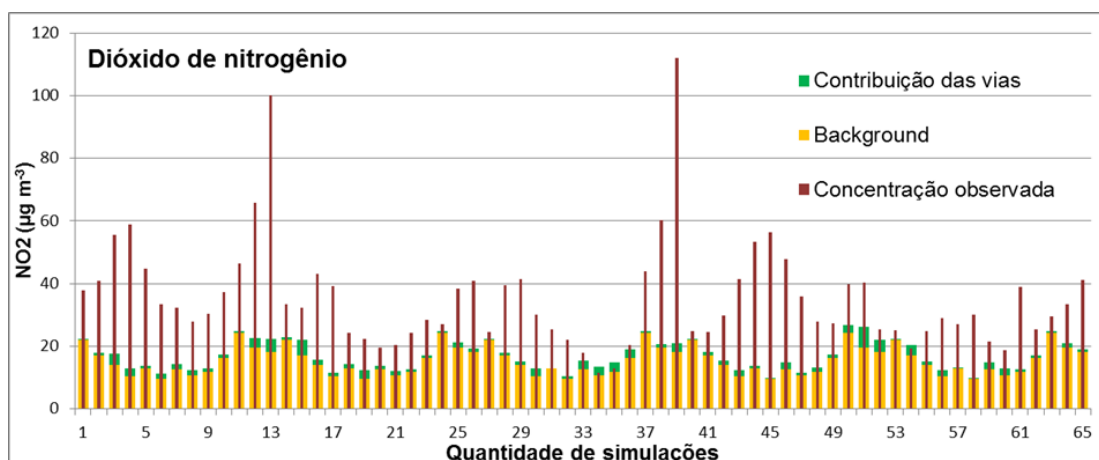


**Figura 5: Resultados da comparação C<sub>P</sub>-C<sub>O</sub> por meio de FB na análise de sensibilidade para dióxido de nitrogênio.**

Ao analisar a relação da contribuição de dióxido de nitrogênio (i.e.: CP - *background*) das vias sobre o ponto receptor, pode-se constatar que, apesar do aumento da atividade veicular, não houve sensível aumento das concentrações previstas pelo modelo. A Figura 6 apresenta a relação entre as concentrações das contribuições



e do background (que somados perfazem a concentração prevista pelo modelo) e a concentração observada pela estação de monitoramento.



**Figura 6: Relação das concentrações de *background*, contribuição das vias e concentração observada na análise de sensibilidade para dióxido de nitrogênio.**

## CONCLUSÕES

Avaliando-se o fato de o modelo não ter gerado em suas simulações contribuição de monóxido de carbono e ter apresenta resultados subestimados para dióxido de nitrogênio das vias do entorno da estação de monitoramento sobre esta, é possível inferir as seguintes possíveis explicações:

- O modelo tem fragilidades para simular áreas com baixo fluxo veicular ou;
- O modelo estaria correto com relação a não contribuição de CO e de subestimação de NO<sub>2</sub> das atividades veiculares das vias sobre a estação de monitoramento e microrregião;

Com relação à primeira hipótese, o modelo não foi capaz associar contribuições quaisquer de CO da atividade veicular na microrregião sobre a qualidade do ar da área. Já para o poluente NO<sub>2</sub> o modelo associou contribuições das atividades veiculares sobre a qualidade do ar da microrregião. Contudo, essas contribuições foram pequenas, gerando C<sub>p</sub> menores que as C<sub>o</sub>, o que poderia ser explicado pela possivelmente não tão acurada cinética de reações do modelo.

Com relação à segunda hipótese, também pode ser avaliado que o modelo está correto ao apresentar os resultados de emissão de CO e de NO<sub>2</sub> das vias como negligenciáveis ou baixos sobre a qualidade do ar da microrregião.

Como o volume de tráfego presente na microrregião pode ser avaliado como “baixo” quando comparado a demais áreas do Rio de Janeiro, essa hipótese leva em conta o fato de que as concentrações de CO e NO<sub>2</sub> observadas pela estação de monitoramento instalada em Bangu são oriundas de outras fontes ou de transporte dos poluentes de vias mais distantes. Essas fontes podem ser as vias do entorno da microrregião, com dezenas a centenas de metros além do buffer de aproximadamente 200 metros das ruas alvos deste estudo.

A análise de sensibilidade apontou que a baixa atividade veicular na microrregião é um fator limitante para a confiança no modelo CALINE4. Isso foi verificado por meio de cenário hipotético de aumento da atividade veicular em oito vezes na área de estudo. Com isso o CO, poluente considerado como de relativa estabilidade química na troposfera, apresentou concentrações previstas mais substanciais, acompanhando o aumento da emissão veicular. Contudo, o NO<sub>2</sub> não apresentou o mesmo comportamento linear. Tal fato pode ser devido às incertezas relacionadas à complexidade da sua reatividade com demais poluentes presentes na atmosfera (NO, O<sub>3</sub> e HCNM). Ressalta-se ainda que o CALINE4 não avaliar a participação de HCNM nas reações de formação e consumo de NO<sub>2</sub>.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANJANEYULU, M., HARIKRISHNA, M., CHENCHUOBULU, S. Modeling ambiente carbon monoxide pollutant due to road traffic. World Academic of Science, Engineering and Technology 17. 2006.
2. BENSON, P. CALINE4. A Dispersion Model for Predicting Air Pollutant Concentrations Near Roadways. Report No. FHWA/CA/TL-84/14. California Department of Transportation, CA, 1989.
3. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Emissões veiculares no estado de São Paulo 2012 [recurso eletrônico]. Coordenação técnica Marcelo Pereira Bales; elaboração Antônio de Castro Bruni [et al.]. São Paulo: CETESB, 2013. Disponível em <[http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/emissao\\_veicular](http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/emissao_veicular)>. Acesso em: 11 de setembro de 2013.
4. COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO DE SÃO PAULO - CET-SP. NT 066/81 – Nota técnica. Métodos para contagem volumétrica abreviada. São Paulo – SP, 23 de janeiro de 1981.
5. KENTY, K.; POOR, N.; KRONMILLER, K.; MCCLENNY, W.; KING, C.; ATKESON, T.; CAMPBELL, S. Application of CALINE4 to roadside NO/NO2 transformations. Atmospheric Environment 41, 2007, p. 4270-4280.
6. RIBEIRO, A. Estudo de correlação das internações hospitalares por câncer, poluição relacionada ao tráfego e nível sócio-econômico (sic) no município de São Paulo [dissertação de mestrado]. Faculdade de Saúde Pública da USP, São Paulo, 2011. 113 p.
7. SECRETARIA MUNICIPAL DE MEIO AMBIENTE – SMAC. Dados horários de monitoramento da qualidade do ar rede MonitorAr - estação de Bangu – Anos 2012 e 2013. Planilha em formato Excel®. Rio de Janeiro, 2014.
8. TACO, G. Desenvolvimento de uma metodologia para identificar espacialmente os níveis de emissão de gases derivados de veículos automotores nas áreas urbanas [dissertação de mestrado. Publicação T.DM-016A/2006. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, agosto de 2006. 156 p.
9. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Air Emission Sources. Nitrogen Oxides. Disponível em: <[http://www.epa.gov/cgi-bin/broker?\\_service=data&\\_debug=0&\\_program=dataprog.national\\_1.sas&polchoice=NOX](http://www.epa.gov/cgi-bin/broker?_service=data&_debug=0&_program=dataprog.national_1.sas&polchoice=NOX)>. Acesso em: 27 de março de 2013.
10. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Protocol for determining the best performing model. EPA-454/R/92-025. Office of Air Quality Planning and Standards, North Carolina, novembro de 1992.
11. WASHINGTON, S.; RANDALL, L.; SPERLING, D. Modeling IVHS Emission Impacts, Volume II: Assessment of the CALINE4 Line Source Dispersion Model. Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, Research Report UCD-ITS-RR-94-18, 1994.