

# MODELAGEM DE DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS: AVALIAÇÃO DE MODELOS DE DISPERSÃO DE POLUENTES EMITIDOS POR VEÍCULOS

## MODELING OF AIR POLLUTANTS DISPERSION: DISPERSION MODEL ASSESSMENT ISSUED BY VEHICLES POLLUTANTS

**Eduardo Monteiro Martins**

Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente/UERJ

**Júlio Domingos Nunes Fortes**

Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente/UERJ

**Ricardo de Araujo Lessa**

Programa de Pos Graduação em Engenharia Ambiental/UERJ

### RESUMO

A poluição atmosférica nas grandes cidades do mundo é prioritariamente de origem veicular. A degradação na qualidade do ar causas prejuízo a saúde das pessoas e ao meio ambiente em geral, acarretando também perdas financeiras. Para a compreensão dos fenômenos que acontecem na troposfera urbana é necessário a utilização de ferramentas de monitoramento dos poluentes e dos modelos de dispersão de poluentes atmosférico. Os modelos de qualidade do podem ter diferentes finalidades, entretanto para a verificação da dispersão de poluentes emitidos por fontes lineares diversos modelos com diferentes fundamentações matemáticas vêm sendo utilizado. Os modelos de dispersão gaussiana estão entre os mais utilizados e em alguns casos os dados de *input* dos modelos são relativamente simples. O presente estudo buscou avaliar uma revisão teórica compreensiva acerca do estado-da-arte existente para modelagem de dispersão atmosférica de poluentes emitidos por veículos no mundo e no Brasil. Uma abordagem exploratória para revisão de modelos existentes capazes de simular numericamente a dispersão de poluentes em ambientes urbanos, considerando as variáveis e detalhes intrínsecos. As principais características de alguns dos principais modelos utilizados atualmente, além das fragilidades foram levantadas e apresentadas. De maneira geral, os dados de entrada para a maioria dos modelos são a direção e velocidade do vento, classe de estabilidade da atmosfera, altura da camada de mistura, taxas de emissão e rugosidade do solo. Modelos mais complexos necessitam de dados de entrada mais complexo.

Palavras Chaves: Emissão veicular, Poluição atmosférica, Modelos de dispersão.

## ABSTRACT

Air pollution in large cities of the world is primarily to convey origin. The degradation in air quality causes damage to human health and the environment in general, also resulting in economic losses. To understand the phenomena that occur in the urban troposphere the use of monitoring tools of pollutants and atmospheric pollutant dispersion models is required. The quality of the models may serve different purposes , but for verification of pollutant dispersion issued by linear sources with many different mathematical foundations are being used . The Gaussian dispersion models are among the most widely used and in some cases the input data models are relatively simple. This study evaluated a comprehensive literature review on the state of the art existing for atmospheric dispersion modeling of pollutants emitted by vehicles in the world and Brazil. An exploratory approach to review of existing models to numerically simulate the dispersion of pollutants in urban environments , considering the variables and intrinsic details. The main features of some major models currently used in addition to the weaknesses were raised and presented . In general, the input data for most models are wind direction and speed, atmospheric stability class, mixing layer, emission rates and roughness of the ground. More complex models requiring more complex input data.

**KEYWORDS:** vehicular emission, atmospheric pollution, air dispersion modeling, numeric simulation.

## INTRODUÇÃO

A poluição do ar ocasionada por fontes veiculares e industriais ao redor do mundo, de um modo geral, foi significativamente reduzida em sua importância devido às ações de mitigação de emissões adotadas pelos órgãos ambientais e pelas indústrias (i.e.: suas chaminés. Dutos e emissões fugitivas). Contudo, as emissões de poluentes oriundas de fontes móveis, especificamente de veículos automotores terrestres, têm crescido ao longo das últimas décadas em todos os países. Tal fato é fruto, sobretudo, do crescimento populacional e, também, de políticas que incentivam o uso e a aquisição de veículos automotores individuais na contramão das adoções de tecnologias que visam à redução das emissões de poluentes oriundos da queima dos combustíveis fósseis. Nos grandes centros urbanos as fontes móveis são as principais responsáveis da degradação do ar.

Para a gestão da qualidade do ar em centros urbanos são fundamentais etapas de monitoramento dos poluentes e as etapas de modelagem que podem fazer previsões dos impactos das emissões na troposfera, seja este impacto causado por fontes fixas ou por fontes móveis. Modelos de dispersão de poluentes atmosféricos se utilizam de equações matemáticas para descrever a atmosfera, dispersão e os processos físicos e químicos que acontecem com uma pluma emitida por uma determinada fonte. Os modelos são de fundamental importância para fazer previsões dos impactos no meio atmosférico de fontes fixas ou fontes lineares.

Nesse âmbito, muitos estudos buscaram avaliar a precisão das modelagens de emissões e dispersão atmosféricas dos poluentes emitidos pelos veículos automotores. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo avaliar e levantar os estudos realizados nessa área ao longo dos últimos anos e décadas. Ou seja, o presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica dos diferentes modelos de dispersão utilizados para a modelagem de fontes lineares de emissão, os principais parâmetros de entradas desses modelos assim como as restrições em cada um dos modelos avaliados e comparação entre os modelos.

## **PARÂMETROS AMBIENTAIS**

Ao se conduzir uma avaliação da dispersão de poluentes atmosféricos, deve-se analisar que tal processo depende principalmente do relevo da região escolhida, do tipo de morfologia do terreno, das condições meteorológicas e das fontes emissoras (TAVARES, 2009).

Eagleman (1991) cita que as principais condições meteorológicas que podem afetar o processo de dispersão são: nebulosidade, pluviosidade, altura da camada de mistura da atmosfera, temperatura, pressão atmosférica, estabilidade atmosférica, direção e velocidade predominante dos ventos.

A morfologia do terreno relativo à área de estudo também afeta diretamente o processo de dispersão, dessa forma os modelos consideram a rugosidade do terreno e o tipo de uso do solo é levado em consideração na maioria dos modelos de dispersão. (BENSON, 1989; TASEIKO et al., 2009).

## DISPERSÃO GAUSSIANA

Modelos de dispersão tendem a ser relativamente complexos e necessitam de realizar uma grande quantidade de cálculos, por esse motivo, desenvolveu-se uma série de algoritmos matemáticos para executá-los. A maioria dos modelos de dispersão de plumas baseia-se na teoria estatística de Gauss.

O Modelo de Dispersão Gaussiana baseia-se nas condições da atmosfera para proceder com suas simulações, onde uma fonte tende a apresentar a dispersão de seus poluentes em uma forma de curva similar à Curva Normal usada em estatística .

Estatisticamente a distribuição normal é caracterizada por apresentar o valor máximo dos intervalos dos dados em sua linha central até que tais valores diminuam em direção às bordas. Segundo Tavares (2009), a borda de uma pluma apresenta concentrações em cerca de 10% do valor central e o Desvio Padrão ( $\sigma$ ) mede a dispersão da concentração do poluente em torno da média ( $\mu$ ).

Desse modo, Braga et al. (2005) explicam que, como resultado, há uma equação diferencial parcial que relaciona as concentrações de um poluente com as coordenadas espaciais, com o tempo e com outros poluentes que possam interferir no poluente em análise, como nos casos de poluentes reativos na atmosfera (Equação 1).

Equação 1:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (2.5)$$

De acordo com essa metodologia baseada no empirismo, a concentração de um determinado poluente em um determinado ponto do espaço é definida pela equação baseada na teoria estatística de Gauss, aprimorada por Boubel (1994).

A movimentação do ar é o principal parâmetro para a dispersão do poluente em uma pluma gaussiana, tanto pelo movimento médio do ar carregando os poluentes quanto pela difusão turbulenta no espaço tridimensional.

É importante salientar que as variáveis meteorológicas que condicionam o processo de dispersão no mundo real são bastante complexas e mutáveis ao longo em um curto período. Por tal motivo, é aceito que se adotem valores médios em certas escalas de tempo para muitos parâmetros (BRAGA et al., 2005).

Onde:

- C é a concentração do poluente analisado na posição x, y e z dada em  $g/m^3$ ;
- Q é a taxa constante de emissão em um determinado período;
- H é a altura efetiva da emissão do poluente, acima da turbulência induzida pelos veículos;
- u é a velocidade do vento em m/s;
- $\sigma_y$  é o coeficiente de dispersão horizontal em velocidade constante de vento;
- $\sigma_z$  é o coeficiente de dispersão vertical (m) e;
- x, y e z são coordenadas cartesianas do ponto.

A pluma gaussiana assume que o vento tem intensidade e direção constantes em um intervalo de tempo, o terreno é genericamente homogêneo em sua característica, a fonte de emissão é “fixa” (mesmo que seja um veículo, este é contemplado através da projeção da via, que é fixa) e constante e que os coeficientes de difusão turbulenta nas outras direções que não a predominante do vento são constantes e não há perda de material poluente (BRAGA et al., 2005).

A emissão  $Q$ , dada em g/s, localizada no espaço pela altura  $h$  (m), emite poluentes em um ambiente com velocidade do vento  $u$  (m/s) (EAGLEMEN, 1991). À altura da fonte  $h$  é somada a altura da elevação da pluma  $h_{el}$  para se calcular a altura  $H$  (m) efetiva da emissão do poluente para a atmosfera.

## MODELOS DE DISPERSÃO

Os modelos de dispersão de poluentes de vias de tráfego começaram a ser desenvolvidos na década de 1970, principalmente nos Estados Unidos. Os primeiros modelos foram CALINE (BEATON et al., 1972), GM (CHOCK, 1978) e HIWAY (ZIMMERMAN & THOMPSON, 1975).

Contudo, os primeiros modelos apresentavam sérias restrições em situações de dispersão com ventos não perpendiculares à via. Tal fragilidade foi sendo corrigida nos modelos (RAO & KEENAN, 1980), modificando-se as curvas de dispersão original e acrescentando um fator de arraste aerodinâmico. Cada modelo apresenta determinada especificidade na sua modelagem ou no modo como requer os dados a serem inseridos.

O segundo modelo da série CALINE foi publicado no final da década de 1970 (WARD, et al, 1977). Contudo, este apresentou sérias restrições para obter bons resultados estatísticos comparados aos dados experimentais. Por esse motivo, foi lançado alguns anos depois o modelo CALINE3 (BENSON, 1979) que apresentou uma sensível melhora em sua acurácia de resultados, considerando rugosidade do terreno, velocidade de deposição, seções elevadas da via e volume da célula de mistura.

Em 1989 foi lançado o modelo CALINE4 (BENSON, 1989) capaz de simular a dispersão em condições de interseções de vias, pontes, vias elevadas ou em depressões, contudo não é aconselhável para ocorrências de classe atmosférica muito instável ou terrenos bastante complexos. Uma comparação entre os modelos CALINE3 e CALINE4 e suas aplicações foi elaborado por Benson (1992).

A seguir são apresentadas algumas características e princípios de diferentes modelos de dispersão com enfoque especial para os modelos que simulam fontes lineares.

ISC/AERMOD (Industrial Source Complex): Modelo baseado em pluma Gaussiana em estado estacionário. É recomendado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – USEPA) como modelo regulador. Incorpora a dispersão do poluente baseado na estrutura turbulenta, considerando fontes em superfícies ou elevadas (chaminés) (USEPA, 2013). Avalia concentrações de poluentes para uma grande variedade de tipos de fontes poluidoras associadas a um complexo industrial: pontuais, área, volume, campo aberto e fontes lineares. É um modelo de ampla utilização comercial.

HIWAY: baseado em pluma Gaussiana em estado estacionário, calcula a concentração de poluentes não reativos oriundos de vias de tráfego, onde cada faixa da via é considerada como uma linha fonte finita e de emissão constante no intervalo de uma hora (ZIMMERMAN & THOMPSON, 1975). O modelo apresenta respostas insatisfatórias para condições de terrenos de morfologia complexa.

HIWAY-2, 3 e 4: baseados em pluma Gaussiana em estado estacionário, diferencia-se da versão anterior por modificar o regime de classes de estabilidade e por apresentar novas curvas de dispersão dos poluentes. Somente considera os efeitos dos veículos, mas ignora a turbulência térmica na dispersão vertical (RAO & KEENAN, 1980; Holmes, 2006).

GM Model: Modelo Gaussiano formulado com base em dados empíricos (CHOCK, 1978) oriundos de estudo de dispersão realizado pela GM na década de 1970. Segundo Sharma & Khare (2001), tal modelo não apresenta as integrações complexas necessárias para um modelo Gaussiano (SHARMA & KHARE, 2001), pois utiliza o conceito de fonte linear finita e um parâmetro de dispersão como função direta da relação orientação vento-via.

M-GFLSM (Modified General Finite Line Source Model): apresenta detalhamentos de processos físicos para o poluente Material Particulado, a saber: falta de reflexão na superfície do solo e deposição gravitacional de partículas (LUHAR et al., 1989). Para a simulação numérica é necessário apresentar informações da fração de partículas da classe granulométrica.

PART 5 (Highway Vehicle Particulate Emission Modeling): programa em linguagem Fortran que apresenta um maior detalhamento cálculo de fator de emissão e modelagem de Material Particulado (1-10  $\mu\text{m}$ ). O Fator de Emissão do Material Particulado inclui as emissões oriundas da exaustão, desgaste do sistema de freios, desgaste dos pneus e ressuspensão de poeira depositada na via (USEPA, 1995).

CALINE3 (California Line Source 3): Recomendado pela USEPA (2013). É a terceira versão de um modelo de pluma Gaussiana de estado estacionário capaz de determinar concentrações de poluentes no ar em pontos receptores à jusante de vias de tráfego intenso (BENSON, 1979). Considera o conceito de Zona de Mistura Inicial para as emissões, pois analisa a região diretamente acima da via de tráfego como uma zona uniforme de emissões e turbulências (mecânica e térmica). O terreno deve apresentar-se de modo não muito complexo e as condições atmosféricas estáveis. O modelo é capaz de calcular concentrações de poluentes, tais como monóxido de carbono, material particulado e gases inertes, em um ponto receptor até 150 metros distante da fonte emissora.

CAL3QHC-R (California Line Source for Queuing & Hot Spot Calculations – Refined): versão refinada do modelo CAL3QHC, da série modelos California Line Source. É um modelo recomendado pela USEPA (2013) que é capaz de calcular concentrações de poluentes relacionando até um ano de dados meteorológicos, além de considerar vias com sinalização semafórica, através do conceito de Fator de Emissão Modal, para veículos parados em cruzamentos (ECKHOFF, 1995 e TAVARES, 2009).



CALINE4 (California Line Source 4): Quarta versão dos modelos CALINE, considera a emissão dos poluentes através do conceito de fonte linear finita, a dispersão Gaussiana também considera o conceito de Zona de Mistura Inicial (BENSON, 1989). O modelo simula as concentrações dos poluentes como monóxido de carbono, material particulado, gases inertes, óxidos de nitrogênio e ozônio. Também é capaz de analisar situações como cânions urbanos. É um modelo amplamente utilizado pela comunidade científica e de significativa disponibilização.

OCD (Offshore and Coastal Dispersion Model Version 5): Recomendado pela USEPA (2013), modelo de pluma Gaussiana capaz de calcular o impacto de emissões offshore oriundas de fontes pontuais, lineares ou áreas sobre a qualidade do ar em regiões costeiras. OCD incorpora as mudanças relacionadas às diferenças de transporte sobre a água ou sobre o continente e os efeitos de *downwash* relativos aos edifícios. (HANNA et al., 1985). Para espécies reativas de poluentes, adota-se o conceito de transformação química em uma taxa em determinado período.

CAR-FMI (Contaminants in the Air from a Road—Finnish Meteorological Institute, version 3): Modelo desenvolvido pelo Instituto de Meteorologia da Finlândia. Considera deposição seca de PM<sub>2,5</sub> em transporte de longa escala e avalia concentrações de emissões de PM<sub>2,5</sub> oriundos de desgastes dos freios, pneus e ressuspensão de material depositado na via (HÄRKÖNEN, 1995; HÄRKÖNEN, 2002 e LEVITIN, 2005).

OSPM (Operational Street Pollution Model): Modelo desenvolvido na Dinamarca e bastante utilizado na Europa (TASEIKO et al., 2009) para situações de simulação em cânions urbanos, com predefinição de condições de baixo fluxo. A modelagem é realizada através de uma combinação de uma pluma de dispersão e um modelo em caixa, capaz de analisar compostos orgânicos voláteis e outros precursores fotoquímicos. O modelo apresenta mecanismo mais aprofundado para comportamento físico em geometria e vias em túneis e cânions (BERKOWICZ et al., 1997; BEROKOWICZ et al., 2003).

USM (Urban Street Model): O modelo detalha e descreve arranjos dos edifícios urbanos e da morfologia urbana combinando densidade de edifícios, altura e permeabilidade dos mesmos em relação ao fluxo do vento, sendo indicado para situações de cânions urbanos. Para análise de material particulado é considerada a emissão de fontes além dos exaustores dos veículos (TASEIKO et al., 2009), como por exemplo desgaste de sistema de freios e dos pneus, além da suspensão do material particulado já depositado na via.

CFD-VIT-RIT: Modelo computacional de fluidos dinâmicos que considera o modelo de turbulência de padrão k-ε para a mistura turbulenta e o conceito de modelo de taxa finita para as reações químicas (WANG, 2011). Considera oxidantes fotoquímicos (HO<sub>2</sub>, RO<sub>2</sub>, HCHO, CH<sub>3</sub>CHO) para a formação de ozônio e consumo/formação de óxidos de nitrogênio.

A Tabela 1 apresenta as principais informações simplificadas dos modelos descritos pelo presente trabalho.

Tabela 1 – Modelos de dispersão de poluentes e suas principais características.

Modelo	Tipos de poluentes	Característica
ISC/AERMOD	CO, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , PTS e MP <sub>10</sub>	Considera terrenos complexos, detalhamento de pontos receptores e dados meteorológicos detalhados.
HIWAY-2, 3 e 4	CO, HC, NO <sub>x</sub> e MP	Cada faixa da via é considerada como uma linha fonte finita e de emissão constante no intervalo de uma hora. O modelo não obtém boas respostas para terrenos de morfologia complexa.
GM MODEL	CO	Modelo desenvolvido em pista de testes. Considera a turbulência criada pelos veículos. Necessita de condições meteorológicas estáveis.

M-GFLSM PART5	CO, MP MP <sub>10</sub>	Considera a deposição do MP. Inclui emissões oriundas da exaustão, sistema de freios, atrito pneu-solo e ressuspensão de poeira depositada na via.
CALINE3	CO, MP e gases inertes	Considera a região diretamente acima da via de tráfego como uma zona uniforme de emissões e turbulências (mecânica e térmica). O terreno deve apresentar-se de modo não muito complexo e as condições atmosféricas estáveis.
CAL3QHC-R	CO e MP	Considera Fatores Modais para avaliar emissões compostas em vias com sinalização e formação de filas de veículos. Processa dados horários no intervalo de um ano.
CALINE4	CO, MP, SF <sub>6</sub> e NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> e O <sub>3</sub>	Contém módulo que simula condições em cânions urbanos. O terreno deve apresentar-se de modo não muito complexo e as condições atmosféricas neutras e estáveis
OCD	CO, gases inertes, SO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>	Assume que toda a emissão de NO <sub>x</sub> é convertida em NO <sub>2</sub> . Diferencia o transporte sobre a água do transporte sobre o continente.
ADMS-Roads	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , MP	Modelo capaz de integrar fontes estacionárias e móveis em diversas formas, com maior de tratamento de variáveis meteorológicas, inclusive para período de 1 ano.
CAR-FMI	CO, NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> , PM <sub>2,5</sub> , PM <sub>10</sub>	Considera deposição seca de PM <sub>2,5</sub> em transporte de longa escala e avalia concentrações de emissões de PM <sub>2,5</sub> oriundos de desgastes dos freios, pneus e ressuspensão de material depositado na via
OSPM	CO, NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> ,	Apresenta mecanismo mais aprofundado para

	COV, HC, precursores fotoquímicos, O <sub>3</sub>	comportamento físico em geometria e vias em túneis e cânions.
USM	PM <sub>10</sub> , NOX/NO <sub>2</sub>	Arranjos e morfologia dos edifícios urbanos combinando densidade de edifícios, altura e permeabilidade dos mesmos em relação ao fluxo do vento.
CFD-VIT-RIT	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> e oxidantes fotoquímicos	Considera oxidantes fotoquímicos (HO <sub>2</sub> , RO <sub>2</sub> , HCHO, CH <sub>3</sub> CHO) para a formação de ozônio.

---

## ESTUDOS COMPARATIVOS E ESTUDOS DE CASOS

Muitos estudos têm sido realizados ao redor do mundo para buscar avaliar a acurácia dos modelos anteriormente citados. Além disso, muitos desses estudos buscam concretizar comparações estatísticas entre os resultados de dois ou mais modelos tendo como base os valores de dados experimentais medidos por estações de monitoramento da qualidade do ar.

Em contrapartida, muitos trabalhos acabam por apontar as fraquezas de alguns modelos e tentam apresentar explicações das possíveis fragilidades dos modelos. Noll et al. (1978) foi um dos pioneiros na avaliação e comparação de modelos de dispersão. Seu estudo comparou os resultados dos modelos HIWAY (ZIMMERMAN & THOMPSON, 1975), CALINE (BEATON et al., 1972) e CALINE2 (WARD, et al, 1977). Os resultados indicaram que, de um modo geral, os modelos apresentaram tendência de superestimar concentrações de CO em condições de ventos paralelos e subestimar as concentrações em condições de ventos oblíquos ou perpendiculares.

Rao et al. (1986) realizou uma avaliação estatística dos modelos CALINE-3 (BENSON, 1979), HYWAY-2 (RAO & KEENAN, 1980) e ROADWAY (ESKRIDGE &

THOMPSON, 1982). Os resultados indicaram que o HIWAY-2 e ROADWAY obtiveram melhores performances, enquanto CALINE-3 foi indicado como aceitável.

Mais recentemente também foram conduzidos alguns trabalhos voltados ao desempenho ambiental da aplicação dos modelos disponíveis através de comparação dos resultados previstos pela simulação com os resultados obtidos por estações de monitoramento e equipamentos de qualidade do ar. Destacam-se: Sivacoumar, et al. (2001) conduziram avaliações dos modelos CALINE3, ISCST2, PAL2 e GM com poluente CO, em Qera, no Egito. Marmur et al. (2003) avaliaram modelos lineares CALINE4 e Hiway-2 através dos resultados de NO<sub>x</sub> em Israel. Peace et al. (2004) avaliaram os resultados do modelo ADMS através de NO<sub>x</sub> para a região de Grande Manchester, Reino Unido. Levitin et al. (2005) observaram os resultados dos modelos CALINE4 e CAR-FMI para NO<sub>x</sub> e O<sub>3</sub>. Berkowicz et al. (2006) ponderaram as concentrações dos poluentes através do modelo OSPM, em Copenhague, Dinamarca. Kenty et al. (2007) conduziram um estudo de avaliação das possíveis fragilidades do modelo CALINE4 para modelagem de dispersão de NO<sub>x</sub> e O<sub>3</sub> em Tampa, Flórida. Yura et al. (2007) ponderaram a resposta do CALINE4 para o módulo de dispersão de PM<sub>2,5</sub> em Sacramento, Califórnia.

## LIMITAÇÕES DOS MODELOS

Apesar dos avanços metodológicos, técnicos e computacionais ao longo das últimas décadas, os modelos de dispersão não estão livres de limitações (NAGENDRA & KHARE, 2002). A capacidade dos modelos ainda reside no fato de assumir condições que simplifiquem as variáveis, principalmente as variáveis ambientais. A Tabela 2 apresenta as principais limitações de alguns dos modelos mais utilizados.

Geralmente, os dados meteorológicos são inseridos no modelo em média horária. O próprio modelo aconselha a realização de simulações somente em condições de “estado estacionário”, além de realizar performances pobres com condições de ventos < 1 ms<sup>-1</sup>.

Tabela 2 - Limitações apontadas para alguns modelos de dispersão de poluentes

Modelo	Limitações apontadas
GM MODEL	Tendência de apresentar resultados superestimados.
Hiway-2	Parâmetros inadequados de dispersão.
Hiway-3 e 4	Desempenho pobre para condições de ventos fracos, resultados superestimados em condições de ventos paralelos e não considera a interferência sobre a pluma devido aos exaustores à quente dos veículos.
CALINE	Resultados superestimados em condições de ventos paralelos e não considera a interferência sobre a pluma devido aos exaustores à quente dos veículos
CALINE3	Valores superestimados em condições de ventos paralelos, tratamento não eficiente para turbulência mecânica e termal induzida pelos gases à quente dos veículos.
CALINE4	Tendência de apresentar resultados superestimados em condições de ventos paralelos. Algoritmos para formação e consumo de NOX e O3 não considera oxidantes fotoquímicos.
GFLSM	Desempenho pobre para condições de ventos fracos.

Adaptado de Sivacoumar, et al. (2001) e Nagendra & Khare (2002).

## CONCLUSÃO

As fontes veiculares são atualmente as fontes predominantes de emissão de poluentes em áreas urbanas. Nesse sentido, os modelos de dispersão gaussiana de poluentes atmosféricos emitidos por veículos automotores têm-se mostrados bastante úteis para prognósticos da qualidade do ar em ambientes urbanos.

Deve-se ter em vista que a capacidade dos modelos ainda reside no fato de assumir condições que simplifiquem as variáveis, principalmente as variáveis ambientais. Por tal fato, todos os modelos apresentam algum tipo de limitação.

Ao longo das últimas décadas muitos trabalhos foram conduzidos ao redor do mundo de modo a tentar criar melhores algoritmos e técnicas estatísticas para o aprimoramento dos modelos.

A revisão da literatura, além de apresentar o estado-da-arte da modelagem de poluentes veiculares ao redor do mundo, também aponta que tais estudos ainda são poucos no Brasil, o que indica que a função mais sublime dos modelos de dispersão (gestão territorial) não é aplicada no planejamento urbano e logístico das cidades brasileiras.

Além disso, faz-se necessário uma ampla utilização e discussão de modelagens de poluentes veiculares no Brasil, buscando avaliar e evoluir a temática para condições tropicais, com temperaturas e índices de radiação global mais elevados, também englobando as especificidades de nossas vias, veículos e combustíveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEATON, J.; RANZIERI, A.; SHIRLEY, E.; SKOG, J. Mathematical approach to estimating highway impact on air quality. Fed. Highway Administration Report No. FHWA-RD-72-36, Washington, DC, 1972.

BENSON, P. A versatile dispersion model for predicting air pollutant levels near highways and arterial streets. Final Report N<sup>o</sup>. FHWA/CA/TL-79/23. California Department of Transportation, Sacramento, CA, 1979.

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.

BENSON, P. A review of the development and application of the CALINE3 and 4 models. Atmospheric Environment Vol. 26B, No 3, 1992, p. 379-390.

BERKOWICZ, R.; HERTEL, O.; LARSEN, S.; SØRENSEN, N.; NIELSEN, M. Modeling traffic pollution in streets. National Environmental Research Institute, Janeiro, 1997.

BERKOWICZ, R.; OLESEN, H.; JENSEN, S. User's Guide to WinOSPM: Operational Street Pollution Model. NERI Technical Report. Draft March, 2003.

BERKOWICZ, R.; WINTHER, M.; KETZEL, M. Traffic pollution modelling and emission data. Environmental Modelling & Software 21, 2006, p. 454-460.

BOUBEL, R. Fundamentals of air pollution. 3<sup>a</sup> edição. Academic Press, California, 1994.

BRAGA, B., HESPANHOL, I., CONEJO, J., MIERZWA, J.C., BARROS, M., SPENCER, M., PORTO, M., NUCCI, N., NEUSA, J, EIGER, S. Introdução à Engenharia Ambiental – O desafio do desenvolvimento

sustentável. 2ª Edição. Pearson Prentice Hall. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 2005.

CERC - CAMBRIDGE ENVIRONMENTAL RESEARCH CONSULTANTS LTD. ADMS-Roads: An air quality management system – User Guide. Version 3.1. Cambridge, September, 2011.

CHOCK, D. A simple line-source model for dispersion near roadways. *Atmospheric Environment* 12, 1978, p. 823-829.

EAGLEMEN, J. *Air Pollution Meteorology*. Lenexa: Trimedia Publishing Company, 1991. 255 p.

ECKHOFF, P.; BRAVERMAN, T. Addendum to the User's Guide to CAL3QHC Version 2.0: CAL3QHCR User's Guide. USEPA, Office of Air Quality Planning and Standards, North Carolina, September of 1995.

ESKRIDGE, R.; THOMPSON, R. Wake of a block vehicle in a shear-free boundary flow: Experimental and theoretical study of the. *Atmospheric Environment* 16, 1982, p. 2821-2836.

GANGULY, R.; BRODERICK, B. Performance evaluation and sensitivity analyses of the general finite line source model for CO concentrations adjacent to motorways: A note. *Transportation Research Part D* 13, 2008, p.198-205.

GOKHALE, S.; RAOKHANDE, N. Performance evaluation of air quality models for predicting PM10 and PM2,5 concentrations at urban traffic intersection during winter period. *Science of the Total Environment* 394, 2008, p. 9-24

HANNA, S.; SCHULMAN, L.; PAINE, R.; PLEIM, J.; BAER, M. Development and Evaluation of the Offshore and Coastal Dispersion Model. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 35:10, 1039-1047. 1985.

HÄRKÖNEN, J.; VALKONEN, E.; KUKKONEN, J.; RANTAKRANS, E.; JALKANEN, L.; LATHINEN, K. An operational dispersion model for predicting pollution from a road. *Journal of Environmental Pollution*. 4-6, 1995, p. 602-610.

HÄRKÖNEN, J. Regulatory dispersion modeling of traffic-originated pollution. Finnish Meteorological Institute, Contributions N°38, FMI-CONT-38. University Press, Helsinki, 2002. 103p.

KAUHANIEMI, M.; KUKKONEN, J.; HÄRKÖNEN, J.; NIKMO, J.; KANGAS, L.; OMSTEDT, G.; KETZEL, M.; KOUSA, A.; HAAKANA, M.; KARPPINEN, A. Evaluation of a road dust suspension model for predicting the concentration of PM10 in a street canyon. *Atmospheric Environment* 45, 2011, p. 3646-3654.

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.

LEVITIN, J.; HÄRKÖNEN, J.; KUKKONEN, J.; NIKMO, J. Evaluation of the CALINE4 and CAR-FMI models against measurements near a major road. *Atmospheric Environment* 39, 2005, p. 4439-4452.

LUHAR A.; PATIL, R. A general finite line source model for vehicular pollution prediction. *Atmospheric Environment* 23, 1989, p. 555-562.

MARMUR, A.; MAMANE, Y. Comparison and evaluation of several mobile-source and line-source models in Israel. *Transportation Research Part D* 8 2003, p. 249-265.

MEDEIROS, A. Bases Metodológicas para a Incorporação da Variável Ambiental no Planejamento da Expansão Termelétrica no Brasil. Tese de doutorado em Ciências e Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.



- NAGENDRA, S.; KHARE, M. Line source emission modeling. *Atmospheric Environment*, 36, 2002, p. 2083-2098.
- NOLL, K.; MILLER, T.; CLAGGETT, M. A comparison of three highway line source dispersion models. *Atmospheric Environment* 12, 1978, p. 1323-1329.
- PEACE, H.; OWEN, B.; RAPER, D. Comparison of road traffic emission factor and testing by comparison of modeled and measured ambient air quality data. *Science of Total Environment* 334-335, 2004, p. 385-395.
- RAO, S.; KEENAN, M. Suggestions for improvement of the EPA-HIWAY model. *Journal of Air Pollution* 30, 1980. p. 247-256.
- RAO, S.; SISTLA, G.; ESKRIDGE, R.; PETERSEN, W. Turbulent diffusion behind vehicles: evaluation of roadway models. *Atmospheric Environment* 20, 1986, p. 1095-1103.
- SIVACOMAR, R.; THANASEKARAN, K. Comparison and Performance evaluation of models used for vehicular pollution prediction. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 127, N°6, 2001.
- SHARMA, P.; KHARE, M. Modeling of vehicular exhausts: a review. *Transportation Research Part D* 6. 2001, p. 179-198.
- TASEIKO, O., MIKHAILUTA, S.; PITT, A.; LEZHENIN A.; ZAKHAROV, Y. Air Pollution Dispersion within urban street canyons. *Atmospheric Environment* 43, 2009, p. 245-252.
- TAVARES, F. Estudo do processo de dispersão de emissões veiculares em uma microrregião de Belo Horizonte utilizando simulação numérica. Dissertação de mestrado. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Belo Horizonte, 2009.
- TOLEDO, G. Avaliação da exposição da população à poluição relacionada ao tráfego no município de São Paulo. Tese de doutorado em Saúde Pública. Universidade de São Paulo, 2010.
- USEPA – U.S. Environmental Protection Agency. Draft User's Guide to Part5: a program for calculating particle emissions from motor vehicles. EPA-AA-AQAB-94-2. Office of Mobile Sources, National Motor Vehicle and Fuels Emission Laboratory, Michigan, 1995.
- USEPA – U.S. Environmental Protection Agency. Preferred/Recommended Models. Disponível em : <[http://www.epa.gov/scram001/dispersion\\_prefrec.htm](http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm)>. Último acesso em fevereiro de 2013.
- WANG, Y.; DENBLEYKER, A., BULLER, E.; ALLEN, D.; ZHANG, K. Modeling the chemical evolution of nitrogen oxides near roadways. *Atmospheric Environment* 45, 2011, p. 43-52.
- WARD, C.; RANZIERI, A.; SHIRLEY, E. CALINE 2: an improved microscale model for the dispersion of air pollutants from a line source. Federal Highway Administration Report, FHWA-RD-77-74, Washington, DC, 1977.
- YURA, E.; KEAR, T.; NIEMEIER, D. Using CALINE dispersion to assess vehicular PM<sub>2,5</sub> emissions. *Atmospheric Environment* 41, 2007, p. 8747-8757.
- ZIMMERMAN, J.; THOMPSON, R. User's Guide for HIWAY, a highway air pollution model. EPA-650/4-74-008. Environmental Monitoring Series, 1975.

Recebido: 15/01/2015

Aprovado: 12/06/2015