

MÉTODO PRÁTICO USADO EM SISTEMAS DE CONTROLE DE POLUENTES EMITIDOS POR VEÍCULOS MOTORIZADOS

Luz Delicia Castillo Villalobos – Doutora, luz.delicia@yahoo.com.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Resumo: As maiores fontes de monóxido de carbono (CO) são os veículos motorizados quando trabalham em marcha lenta e quando não estão devidamente regulados. Paralelamente à poluição com monóxido de carbono, crescem também as emissões ácidas, ou seja, emissão de gases capazes de formarem ácidos. Portanto, o objetivo do presente trabalho é apresentar um método alternativo no controle da quantidade de poluição emitida no ambiente urbano como consequência do tráfego de veículos. A metodologia apresentada utiliza como ferramenta de previsão as probabilidades. As probabilidades foram construídas a partir da “frequência” dos acontecimentos, dando condição de fazer previsões considerando efeitos de fatores que não são possíveis de ser controlados como, por exemplo, os efeitos provocados pela estrutura e composição física da área observada. A aplicação do presente trabalho tem como objetivo mostrar o procedimento de como se aplica o método proposto.

Palavras-chave: Monóxido carbono, Veículos motorizados, Método.

1. INTRODUÇÃO

As questões ligadas ao meio ambiente constituem um dos temas que mais preocupam neste século. A necessidade de redução dos poluentes do ar tornou-se um problema mundial. Seu estudo é cada vez mais complexo, pois muitos fatores ingovernáveis intervêm na formação de poluentes. Uma das consequências mais preocupantes da emissão de poluentes é o aquecimento global, problema que ameaça nossa sobrevivência e, portanto, um problema que envolve todos nós. Está comprovado que a temperatura média do Planeta Terra está subindo. Já é inevitável o aumento de 2 graus centígrados na temperatura média até o final do século. Se nada for feito, no pior dos cenários, o aquecimento será de 7 graus centígrados. As consequências desta elevação de temperatura serão catastróficas, só depende de nós não deixar isto acontecer (SCHIEL; BORTHOLIN; GUEDES, 2003).

Os veículos motorizados são os grandes responsáveis pela poluição na cidade. Em 2006, carros, motos, ônibus e caminhões emitiram 97% de todo o monóxido de carbono, presente no ar que o paulistano respira. O monóxido de carbono (CO) representa o principal poluente dos veículos motorizados leves (CETESB, 2006).

O que mais aflige nesta problemática são os efeitos maléficos que estes poluentes causam sobre a saúde e a vida dos seres vivos. Estudos epidemiológicos e toxicológicos conduzidos por entidades de reconhecida reputação internacional, como por exemplo, a Organização Mundial da Saúde (OMS), demonstram haver uma forte relação entre a

ocorrência da poluição atmosférica e o aumento de casos de doenças respiratórias, podendo-se citar: asma, bronquite, infecção pulmonar. Da mesma forma, existe a relação de casos envolvendo situações de desconforto físico: irritação dos olhos, nariz e garganta, dor de cabeça, acessos de tosse e sensação de cansaço. Esses problemas têm alto custo social, sendo caracterizados por gastos com tratamentos médicos, perda de horas de trabalho e redução da produtividade. Boa parte desses custos é transferida ao estado através dos serviços de saúde e previdência social públicos. É importante destacar que a poluição atmosférica tem sido causa de mortes, seja na forma de precursora de doenças, dentre elas o câncer pulmonar, seja como responsável pelo agravamento de doenças cardiorrespiratórias. A Organização Mundial da Saúde também divulgou que 3 milhões de pessoas morrem anualmente devido aos efeitos da poluição atmosférica. Isto representa o triplo das mortes anuais em acidentes automobilísticos. Um estudo publicado na revista científica inglesa *The Lancet*, em 2000, concluiu que a poluição atmosférica na França, Áustria e Suíça é responsável por mais de 40.000 mortes anuais nesses três países. Cerca da metade dessas mortes se deve à poluição causada pelas emissões dos veículos motorizados (FISCHLOWITZ-ROBERTS, 2003).

Em 1997, foi assinado um acordo internacional por 84 países em Kyoto, no Japão, denominado Protocolo de Kyoto que estabelece, entre 2008 e 2012, a redução de 5,2% dos gases estufa em relação aos níveis de 1990. As metas de redução acordadas no protocolo de Kyoto foram: países da União Européia 8%, Estados Unidos 7% e Japão 8%. Para a China e países em desenvolvimento como o Brasil, México e a Índia, ainda não foram estabelecidos os níveis de redução de poluentes. Em 2004 ocorreu uma reunião na Argentina que fez aumentar a pressão para que se estabelecessem metas de redução na emissão de gases por parte dos países em desenvolvimento até 2012. O ano que marcou o início efetivo do Protocolo de Kyoto foi 2005, vigorando a partir do mês de fevereiro.

No Brasil, segundo declaração de Saldiva (2007), professor da Faculdade de Medicina da USP e chefe do Laboratório de Poluição Atmosférica da FMUSP, pesquisas já demonstraram que os habitantes dos grandes centros urbanos geralmente apresentam uma inflamação (pulmonar e sistêmica) imperceptível, sem sintomas, aumento da pressão arterial, maior risco de arritmias e infarto do miocárdio. Estima-se que os níveis atuais de poluição em São Paulo reduzam a expectativa de vida em cerca de um ano e meio, devido a três motivos principais: câncer de pulmão e vias aéreas superiores; infarto agudo do miocárdio e arritmias; e bronquite crônica e asma.

Portanto, o trabalho desenvolvido busca contribuir em parte com a solução deste problema que é desenvolver uma metodologia que permita prever a quantidade de poluentes emitidos pelo fluxo de veículos motorizados que passam por um determinado ponto de uma via. A previsão desses níveis de poluição orientará ao planejador do tráfego da cidade a detectar os problemas de poluição de maneira simplificada e formular soluções para minimizar os efeitos negativos, melhorando a qualidade de vida da população.

As quantidades de poluição emitidas serão medidas em quantidades de monóxido de carbono (CO). A escolha da concentração de monóxido de carbono para representar a quantidade de poluição emitida em uma determinada região deve-se a importância que este tipo de poluente tem para a qualidade do ar urbano como foi mencionado acima e, também, pelas características inerentes a ele conforme é mostrado a seguir: é emitida por todos os veículos motorizados, sua emissão apresenta forte correlação com os regimes de operação do tráfego, em áreas urbanas e pode ser usado como um indicador dos níveis de poluição atmosférica causada por outro tipo de poluentes (ex: hidrocarbonetos e chumbo) (FREITAS, 1991).

A metodologia utiliza as probabilidades como ferramenta de previsão, permitindo estabelecer uma relação entre quantidade de veículos e a quantidade de CO emitido no ponto observado da via. Uma característica importante das probabilidades é que ela se constrói a partir da “frequência” dos acontecimentos, possibilitando detectar efeitos de outros fatores que não são possíveis de controlar. Portanto, para aplicação desta metodologia, é importante manter registros permanentes de dados sobre quantidade de veículos e quantidade de CO, para poder obter resultados satisfatórios nas previsões. Estes registros devem ser feitos para cada região considerada crítica, já que em cada uma delas a quantidade de CO emitida pelos veículos motorizados é diferente. Esta diferença está ligada às características do local pesquisado, como, por exemplo, vias com aclives e declives, provocando maior e menor aceleração dos veículos e, portanto, mais emissão de poluentes. Outro exemplo é a existência de prédios altos fechando a região, não deixando que circule o ar, tendo como consequência maior concentração de poluentes.

A qualidade dos dados é uma fase determinante nesta metodologia para dar condições de providenciar “alarmes” úteis, que prevêm situações potencialmente perigosas, como episódios de poluição elevada. Portanto a presente metodologia busca obter medidas de poluição por região que permitam comparar com os padrões estabelecidos pelas normas nacionais e internacionais.

Os aspectos econômicos de controle ou da tolerância de quantidade de poluentes permitidos em uma determinada região são complexos, mas as buscas de novos métodos que contribuíssem de alguma forma com este fim, devem ser consideradas, já que contribuem para a qualidade de vida das pessoas.

2. DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA

Em princípio serão definidas as variáveis que participam na construção da metodologia, que serão: a quantidade de veículos que passam pelo ponto de observação em um determinado intervalo de tempo, que serão medidos em veículos por unidade de tempo e a quantidade de monóxido de carbono (CO) registrado no mesmo intervalo de tempo, medidos em número de partículas por milhão de partes de mistura (ppm) (CETESB, 1985).

A participação destas duas variáveis leva a construir um modelo bivariável, onde a quantidade de concentrações de CO representado por Y e a quantidade de veículos representados por X são variáveis aleatórias da forma (y_1, y_2, \dots, y_n) e (x_1, x_2, \dots, x_m) respectivamente, portanto as probabilidades marginais de cada variável é:

$$P(X=x_i) = f(x_i) > 0; \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m f(x_i) = 1 \quad (2)$$

$$P(Y=y_j) = g(y_j) > 0; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n g(y_j) = 1 \quad (4)$$

A função de probabilidade conjunta das variáveis aleatórias, quantidade de veículos e quantidade de CO se representa por $P(X, Y)$ onde:

$$P(x_i, y_j) \geq 0, \text{ para todo } (x, y_j). \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m P(x_i, y_j) = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n P(x_i, y_j) = g(y_j) \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^m P(x_i, y_j) = f(x_i) \quad (8)$$

Partindo do suposto que X e Y não são linearmente independentes pelo comportamento característico delas, então a função condicional ou probabilidade condicional de uma determinada quantidade de CO dado uma certa quantidade de veículos passando pelo ponto observado é:

$$g(Y/x_i) = \frac{P(x_i, y_j)}{f(x_i)} \quad (9)$$

Informações sobre probabilidade condicional podem ser encontradas em Barry James (1981).

O valor esperado é:

$$E(X, Y) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m P(x_i, y_j)(x_i, y_j) \quad (10)$$

Por ser X e Y duas variáveis aleatórias não linearmente independentes, sua covariância é:

$\sigma_{xy} \neq 0$, então:

$$\sigma_{xy} = E(X, Y) - E(X)E(Y) \quad (11)$$

Onde:

$E(X)$, é o valor esperado da quantidade de veículos que passam pelo ponto observado.

$E(Y)$, é o valor esperado da quantidade de concentrações de CO no ponto observado.

Como o estudo se baseia na dependência de Y em relação a X , será necessário estabelecer esta relação, que parte do suposto que é uma relação linear, para poder aplicar as propriedades da regressão linear. Em caso de estar frente a uma relação não linear, recomenda-se transformar em uma forma linear usando os métodos convenientes, ver em Kamenta (1990), Box e Cox (1964), Box e Tidwell (1962) e Montgomery (1992).

A relação linear será estabelecida entre a quantidade de veículos que passam pelo ponto de observação e a quantidade de CO registrado. A variável considerada dependente é representada por uma média condicional da quantidade de poluentes emitidos, dado uma certa quantidade de veículos, expressa como:

$$\mu Y / x_i = E \left(\frac{P(x_i Y)}{f(x_i)} \right) \quad (12)$$

Então a relação entre Y e X será dada pelo conjunto dos pontos $(x_i, \mu Y / x_i)$, cuja expressão linear é:

$$\mu Y / x_i = a + b x_i \quad (13)$$

Onde: a e b são os parâmetros do modelo cujos valores são calculados através das expressões:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_i y_j) P(x_i, y_j) - \sum_{i=1}^m f(x_i) x_i \sum_{j=1}^m y_j g(y_j)}{\sigma_x^2} \quad (14)$$

$$a = \sum_{i=1}^m f(x_i) \mu Y / x_i - b \sum_{i=1}^m f(x_i) x_i \quad (15)$$

É importante antes de considerar o modelo como válido, verificar se as suposições da regressão linear não foram violadas, usando para tanto análises dos resíduos, ver Chatterjee & Price (1977).

Outra forma de verificar se o ajuste é bom consiste em que as somas das variâncias condicionais tendam a zero. Em caso de um ajuste perfeito esta soma é zero (MODE, 1970).

$$\sum_{i=1}^m \sigma^2 Y / x_i = \sum_{i=1}^m E(Y - \mu Y / x_i)^2 = 0 \quad (16)$$

Quando existe um ajuste inadequado, a soma das variâncias é relativamente grande.

3. APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

A aplicação da presente metodologia foi realizada na cidade de Pato Branco, PR., na interseção da Rua Itacolomi com a Rua Paraná. O trânsito no cruzamento é controlado por semáforo operando a tempo fixo modo isolado. A quantidade de veículos que passam pelo cruzamento e o desconforto que tal cruzamento ocasiona às pessoas nos horários de pico justificam seu estudo.

Inicia-se o desenvolvimento da aplicação com a construção do modelo bivariável que está composto pelas variáveis consideradas na metodologia e são: Fluxo de veículos (X) medidos em intervalos de 10 minutos, e concentrações de CO (Y) medidos em ppm. Os fluxos veiculares e as quantidades de CO foram medidos nos mesmos horários e nos mesmos dias, com intervalos de tempo de 10 minutos.

O modelo parte do cálculo das probabilidades marginais $f(x_i)$ e $g(y_j)$, onde $i = 1, 2, \dots, 6$ e $j = 1, 2, \dots, 6$, cujos valores são dados na tabela 1.

Tabela 1 – Probabilidades marginais das variáveis fluxos veiculares e concentrações de monóxido de carbono (CO)

Veículos /10 minu	Probabilidades marginais dos veículos	Concentrações de CO em ppm	Probabilidades marginais de CO
$x_1 = 46$	$f(x_1) = 0,10$	$y_1 = 1,07$	$g(y_1) = 0,03$
$x_2 = 69$	$f(x_2) = 0,10$	$y_2 = 1,75$	$g(y_2) = 0,27$
$x_3 = 92$	$f(x_3) = 0,20$	$y_3 = 2,43$	$g(y_3) = 0,40$
$x_4 = 115$	$f(x_4) = 0,37$	$y_4 = 3,10$	$g(y_4) = 0,20$
$x_5 = 138$	$f(x_5) = 0,13$	$y_5 = 3,78$	$g(y_5) = 0,00$
$x_6 = 161$	$f(x_6) = 0,10$	$y_6 = 4,46$	$g(y_6) = 0,10$

Segundo a tabela 1 a quantidade de monóxido de carbono mais freqüente registrada na interseção observada é em média 2,43 ppm.

As probabilidades conjuntas das variáveis analisadas estão apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 – Probabilidades conjuntas das variáveis fluxos veiculares e concentrações de monóxido de carbono (CO)

	$P(x_1, y_j)$	$P(x_2, y_j)$	$P(x_3, y_j)$	$P(x_4, y_j)$	$P(x_5, y_j)$	$P(x_6, y_j)$
$P(x_i, y_1)$	0,03	0,07				
$P(x_i, y_2)$		0,03	0,07			
$P(x_i, y_3)$		0,07	0,1	0,03		
$P(x_i, y_4)$		0,1	0,2	0,07		
$P(x_i, y_5)$			0,03	0,1		
$P(x_i, y_6)$						0,1

O fato que acontece neste cruzamento com maior probabilidade (0,2) é a passagem de 92 veículos em intervalos de 10 minutos em média, produzindo uma poluição medida em concentrações de CO de 3,10 ppm.

Como o interesse da metodologia não é só determinar as probabilidades pontuais de cada instante observado, senão também de construir um modelo que complete o objetivo de previsão, então a relação construída é:

$$\mu Y / x_i = 1,423593 + 0,010537x_i$$

Usando as propriedades da regressão linear foi possível calcular o coeficiente de determinação do modelo ajustado, cujo valor é igual 0,8, o qual indica que a reta de regressão ajusta-se bem às observações. Também foi provado que existe um efeito linear

entre as variáveis que participam no modelo. Para tanto foi utilizado o teste estatístico F, cujos valores são, $F_0 = 40,00 > F_{0,05}(1,4) = 7,71$.

Para verificar se as suposições da regressão não foram violadas foi utilizada a análise de resíduos, a qual mostrou que não existe falta de linearidade. Os erros têm variância constante e não foi detectada observação extrema. Em relação à normalidade dos resíduos, não foram obtidas indicações de violação a este suposto.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo do presente trabalho de passar um novo método que sirva como ferramenta de controle de poluentes foi alcançado, já que mostra um procedimento de fácil manipulação pelos técnicos pesquisadores preocupados pela qualidade do ar das cidades onde se registram alto volume de veículos motorizados.

O uso das probabilidades permitiu através das frequências observadas determinar o grau de incidência de um determinado volume médio de veículos sobre a quantidade de poluição existente na área.

Usando as probabilidades, também foi possível construir uma relação que permita fazer provisões diretas para certa quantidade de veículos que passam pelo ponto observado em relação à quantidade de CO registrado na região.

Também é possível prever a quantidade de outros poluentes que os veículos motorizados emitem e que estão altamente correlacionados com a quantidade de CO emitido.

O estudo de caso pode-se caracterizar como uma situação não crítica como mostra as probabilidades conjuntas cujos valores são baixos, sendo que a quantidade mais alta de poluição registrada no cruzamento foi de 4,46 ppm com uma probabilidade de 0,1 produzida por uma quantidade média de 161 veículos em intervalo de 10 minutos. Também se podem ter conclusões parciais dos acontecimentos, como por exemplo, a probabilidade que no local de pesquisa passem 115 veí/10 minu. é 0,37.

Como se pode observar nos quadros 1 e 2, as probabilidades marginais e conjuntas têm valores baixos, significando que existe variabilidade significativa da quantidade de veículos e a quantidade de poluição registrada durante o intervalo de tempo de observação. Isto é existe mudança permanente nas características do tráfego e na quantidade de CO emitida na área durante o dia.

Concluindo, o objetivo da aplicação foi mostrar como o método deve ser usado. Mas ele pode ser aplicado em cidades de grande porte onde se registrem altos índices de poluição que precisem ser controlados, contribuindo de alguma forma com a qualidade de vida das pessoas dessa região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARRY, R. J.– *Probabilidade*. Instituto de Matemática Pura e Aplicada IMPA. 1981.

BOX, G. E. & COX D. R. - An Analysis of Transformations. *Journal of the Royal Statistical Society*, serie B, v. 26, n. 2, p. 211-243, 1964.



BOX, G. E. & TIDWELL P.W. - Transformation of the Independent Variables. *Technometrics*, Vol. 4, n.4 p. 531-550, 1962.

CETESB – *Inventário de Emissão Veicular: Metodologia de cálculo*. São Paulo, 1985.

CETESB - *Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo*, 2006

CHATTERJEE, S. & PRICE B.– *Regression Analysis by Example*. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1977.

FISCHLOWITZ-ROBERTS, B. - *Poluição atmosférica mata três vezes mais que o trânsito*. *Eco* 21, Rio de Janeiro. V.13, n.75, p. 28-30, fev. 2003.

FREITAS, I. M. D. P. - Método para Determinar a Capacidade Ambiental em Vias Urbanas: O Caso das Interseções Semaforizadas. *Tese de Mestrado COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro*, 1991.

KAMENTA, J. - *Elementos de Econometria*. Vol. 2, ed. Atlas S. A. São Paulo, 1990.

MODE, E. B.– *Elementos de Probabilidades y Estadística*. Ed. Reverte Mexicana, S. A. 1970.

MONTGOMERY, D.C. & PECK E. A. - *Introduction to Linear Rrgression Analysis*, 2^a ed. John Wiley e Sons, Inc., New York, 1992.

SCHIEL, D. BORTHOLIN, E. & GUEDES, B. - *Material didático de Licenciatura em ciência exata*. USP. São Paulo. Texto disponível na Internet.
<http://educar.sc.usp.br/licenciatura/2003/ee/Efeito_Estufa.html> Acessado em: 16 de fevereiro 2009.

SALDIVA, P.- Declarações disponível na Internet.
<<http://www.usp.br/espacoaberto/arquivo/2007/espaco83set>> Acessado em: 11 de fevereiro de 2009.

PROTOCOLO DE KYOTO. Texto disponível na Internet.
<http://www.greenpeace.org.br/clima/pdf/protocolo_kyoto.pdf> Acesso em:20 jun. 2007.