

Artigo

Impactos das Variáveis Meteorológicas na Qualidade do Ar da Região da Grande Vitória, Espírito Santo, Brasil

Edson Zambon Monte¹, Taciana Toledo de Almeida Albuquerque^{2,3}, Valdério Anselmo Reisen⁴

¹*Programa de Pós-Graduação em Economia e Grupo de Pesquisa em Econometria, Departamento de Economia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.*

²*Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

³*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.*

⁴*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Programa de Pós-Graduação em Economia, Departamento de Estatística, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.*

Recebido: 28/11/2014 - Aceito: 16/2/2016

Resumo

Este trabalho objetivou verificar os impactos das variáveis meteorológicas temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação sobre a qualidade do ar, na Região da Grande Vitória, Espírito Santo, Brasil, considerando o poluente material particulado inalável (MP₁₀), por meio do modelo Logit. O período de estudo foi de janeiro de 2005 a dezembro de 2010, onde a qualidade do ar foi classificada como “não boa” e “boa”. Também foram estimados os efeitos dos dias da semana e das estações do ano sobre a probabilidade de ocorrência de qualidade do ar “não boa”. Os resultados demonstraram que os fatores meteorológicos precipitação pluviométrica e velocidade do vento contribuíram significativamente para a redução da probabilidade de ocorrência de qualidade do ar “não boa”. Além disso, os resultados simulados mostraram que, durante os finais de semana, as chances de ocorrer qualidade do ar “não boa” foram fortemente reduzidas e, nas estações do outono e do inverno, a probabilidade de se verificar qualidade do ar “não boa” caiu de maneira relevante.

Palavras-chave: variáveis meteorológicas, poluição do ar, MP₁₀, modelo Logit.

Impacts of Meteorological Variables on Air Quality in The Region of Grande Vitória, Espírito Santo, Brazil

Abstract

The objective of this study was to determine the impacts of meteorological variables, such as temperature, relative humidity, wind speed and precipitation, on the air quality in the Region of Grande Vitória, Espírito Santo, Brazil, considering the pollutant PM₁₀ and using the Logit model. The period of study was from January 2005 to December 2010 and, in this study, the air quality was classified as “not good” and “good”. The day of the week and season effects over the air quality “not good” were also estimated. The results showed that the precipitation and the wind speed contributed significantly to the reduction of the probability of air quality “not good”. In addition, during the weekends the probability of air quality “not good” was greatly reduced and in the autumn and winter seasons the probability of air quality “not good” falls significantly.

Keywords: meteorological variables, air pollution, PM₁₀, Logit model.

1. Introdução

As questões relativas à qualidade do ar têm se tornado cada vez mais importantes, uma vez que vários problemas de saúde decorrem da poluição atmosférica, dentre eles: asma, rinites, ardor nos olhos, cansaço, tosse seca, doenças cardiovasculares e pulmonares, insuficiência cardíaca, etc. Autores como Brunekreef e Holgate (2002), Maynard (2004), World Health Organization (Who, 2005), Curtis *et al.* (2006), entre outros, demonstraram a relação entre os poluentes clássicos (partículas inaláveis com diâmetro menor que 10 microns (MP₁₀), monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e ozônio (O₃)) e os problemas de saúde. No ano de 2012, por exemplo, a morte de 4,3 milhões de pessoas foi atribuída à poluição atmosférica (Who, 2014). Além disso, a poluição do ar contribui para a degradação do meio ambiente, ajudando na propagação do efeito estufa.

Ressalta-se que, a intensificação do processo de industrialização ocorrida no século XIX, aliado ao crescimento populacional, especialmente, o crescimento da população urbana em detrimento da rural, vem aumentando as preocupações dos governos, sejam locais ou centrais, relacionadas à proteção do meio ambiente. Em relação à poluição do ar, de acordo com Vingarzan (2004) e Oltmans *et al.* (2006), em diversas partes do mundo essa vem crescendo em função, principalmente, da industrialização, da urbanização e da queima de combustíveis fósseis. Conforme Gramsch *et al.* (2006), dado que a poluição atmosférica é mais concentrada em áreas urbanas e industriais, os esforços de monitoramento da qualidade do ar são maiores nestas áreas ou regiões.

Nesse contexto, vale ressaltar que, a economia do estado do Espírito Santo, onde se encontra a Região da Grande Vitória (RGV) (a RGV é formada por cinco municípios: Cariacica, Serra, Viana, Vila Velha e Vitória), foco deste estudo, vem crescendo fortemente no decorrer dos últimos anos, especialmente, a partir de 2003, inclusive com taxas de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) superiores à média nacional. Com isso, diversas indústrias e empresas se instalaram ou ampliaram suas instalações no estado, principalmente, na RGV, o que tende, consequentemente, a elevar o nível de poluição atmosférica, mesmo existindo diversas regulamentações impostas pelos órgãos de controle ambiental a essas indústrias e empresas. Além disso, o crescimento da frota de veículos, o maior consumo de energia e etc., também contribuíram para a maior emissão de poluentes na região.

Destaca-se aqui que, no ano de 2010, a população do Espírito Santo era de 3.514.952 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2014). Desse total, 1.687.704 estava residindo na Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV), que é composta pelos municípios da RGV, mais Fundão e Guarapari. Tomando-se somente a RGV, a população chegou a 1.565.393, o que representou cerca de 44,54% da população capixaba. Logo, uma vez

que Gramsch (2006) descreve que a maior concentração de poluentes está nas áreas urbanas e industriais, aproximadamente 45% da poluição capixaba foi fortemente afetada pelas emissões de poluentes atmosféricos.

Importante destacar que, dentre os principais poluentes atmosféricos estão: CO, chumbo (Pb), material particulado (MP), SO₂, NO_x e O₃ (US Epa, 2014). Para Liu *et al.* (2013), os dois contaminantes atmosféricos que mais preocupam em relação à saúde humana são o ozônio e o material particulado, além de causarem vários danos ao meio ambiente. Segundo o último relatório de qualidade do ar da Secretaria Estadual do Ambiente do Espírito Santo (SEAMA), referente ao ano de 2013, a RGV vem apresentando problemas ambientais e sociais devido às concentrações de MP₁₀ observadas nas estações locais de monitoramento. Devido aos problemas recorrentes da região com partículas, este trabalho teve como foco principal avaliar se as concentrações de material particulado inalável sofrem influência das condições meteorológicas observadas na região.

De acordo com Moreira, Tirabassi e Moraes (2008), as condições meteorológicas desempenham um papel importantíssimo na dispersão ou acumulação de poluentes. Liu e Johnson (2002) descreveram que a poluição do ar está associada, geralmente, à fatores como temperatura, umidade relativa, velocidade e direção do vento, entre outros. Como exemplo, tem-se que a baixa umidade relativa e a reduzida velocidade do vento tendem a elevar os níveis de poluentes. Já a ocorrência de precipitação pluviométrica e o aumento da velocidade do vento contribuem para a dispersão e diluição dos poluentes e, consequentemente, para a redução da concentração dos mesmos. Nesse contexto, destaca-se que, como na estação do verão ocorrem maiores volumes de chuvas do que no inverno, por exemplo, a tendência é que para poluentes como o MP₁₀, a concentração seja menor no período do verão.

Dessa forma, este trabalho objetivou avaliar os impactos das variáveis meteorológicas temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação na qualidade do ar da RGV (isso foi realizado por meio da classificação da qualidade do ar, no que tange ao poluente MP₁₀, em “não boa” e “boa”, conforme detalhado no item “2.1. Região de estudo e apresentação das variáveis”), considerando o poluente MP₁₀, por meio do modelo Logit simples. Além disso, foram estimados os efeitos de cada dia da semana e de cada estação do ano na probabilidade de acontecer incrementos de concentração de MP₁₀.

Uma das vantagens do modelo Logit é realizar estimativas de probabilidades de ocorrências em variáveis dependentes do tipo binário (*dummy*). Vale dizer que, apesar do modelo Logit ser amplamente utilizado para verificar os efeitos dos poluentes atmosféricos sobre os problemas de saúde, ver, por exemplo, Gent (2003) e Gehring *et al.* (2013), esse modelo, ainda, é pouco adotado nas análises

que envolvem os impactos das variáveis meteorológicas na qualidade do ar.

No mais, nota-se, na literatura, um grande número de publicações que avaliam os impactos das variáveis meteorológicas sobre as concentrações de alguns poluentes, usando os modelos de regressão usuais (que consideram a variável dependente como contínua), por exemplo: 1) Liu e Johnson (2002), que realizaram previsões para picos diários de concentração de ozônio, em Milwaukee, Estados Unidos, adotando o modelo de regressão com erros de séries temporais (RTSE); 2) Liu *et al.* (2013), que investigaram a sensibilidade das concentrações de ozônio troposférico à variação da temperatura, em Taiwan, na China; 3) Lyra *et al.* (2011), que ajustaram e estimaram a concentração de MP_{10} , em função das condições meteorológicas, utilizando modelos de regressão linear múltipla, na cidade do Rio de Janeiro, Brasil; entre outros.

Entretanto, não foram encontrados muitos estudos que utilizaram o modelo Logit considerando a variável dependente como dicotômica (*dummy*) ou binária (variáveis dicotômicas (*dummies*) ou binárias são variáveis discretas que assumem valor igual a um se o evento ocorre e, zero, caso contrário (evento não ocorre)), conforme discutido no presente artigo. Com objetivo semelhante pode-se citar Kuchenho e Thamerus (1996), que utilizaram a técnica de regressão logística para estudar os eventos extremos de poluição do ozônio e do dióxido de enxofre, em Munique, na Alemanha, encontrando efeitos significativos das variáveis meteorológicas, tais como temperatura, velocidade do vento e umidade, sobre estes eventos extremos. Também, destaca-se Leite *et al.* (2011), que utilizaram a regressão logística simples para verificar a qualidade do ar atmosférico (considerando o poluente MP_{10}) na cidade de Uberlândia, Minas Gerais. Os autores verificaram que a umidade relativa e a precipitação influenciam significativamente a concentração de MP_{10} .

Importante dizer que, em seus resultados, Leite *et al.* (2011) focaram no cálculo da probabilidade de ocorrência de níveis de MP_{10} inferiores ou iguais a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, o que os autores denominaram de qualidade do ar “boa”. No entanto, a pesquisa desenvolvida no presente artigo verificou o efeito marginal de cada variável preditora sobre a probabilidade de ocorrência de qualidade do ar “não boa”, relativa ao MP_{10} , o que a difere da proposta de Leite *et al.* (2011).

Este artigo está estruturado da seguinte forma. Além desta introdução, a seção 2 traz uma descrição da região de estudo, as variáveis utilizadas e o modelo estatístico adotado. Na seção 3 apresentam-se as estimativas do modelo Logit. Por fim, as conclusões são apresentadas na seção 4.

2. Materiais e Métodos

2.1. Região de estudo e apresentação das variáveis

A área de estudo compreendeu a Região da Grande Vitória, Espírito Santo, Brasil. Por estar situada na região litorânea, a RGV apresenta clima tropical quente (Aw), possuindo inverno ameno e seco, e verão chuvoso e quente. As temperaturas médias variam entre 24°C (Celsius) e 30°C e os ventos predominantes são de Norte/Nordeste na primavera/verão, sofrendo alterações durante outono e inverno devido ao posicionamento do sistema de alta pressão (Alta Pressão Subtropical do Atlântico Sul – ASAS) mais próximo do continente, possibilitando alterações na direção predominante do vento, a qual passa a variar entre as direções Sul/Oeste (para mais detalhes, ver Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA, 2014)). A RGV possui oito estações de monitoramento de qualidade do ar, que fazem parte da Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar (RAMQAr), a saber: Laranjeiras; Carapina; Jardim Camburi; Enseada do Suá; Vitória – Centro; Vila Velha – Ibes; Vila Velha – Centro; e, Cariacica (Fig. 1).

Os dados utilizados nesta pesquisa foram medidos pelas estações da RAMQAr, compreendendo o período de janeiro de 2005 a dezembro de 2010. A RAMQAr fornece dados horários de concentração de MP_{10} . De posse das concentrações horárias foi realizada a média de 24 h para cada estação. Após o cálculo das médias de 24 h, identificou-se a maior média de 24 h entre as oito estações, e essa maior concentração média foi selecionada para representar a concentração média de um determinado dia para toda região.

Para atingir o objetivo proposto, este trabalho tomou como base o relatório de qualidade do ar do Estado de São Paulo (Cetesb, 2014). Nesse caso, foi considerada a classificação do índice de qualidade do ar (IQA) para o MP_{10} , índice este que está associado a efeitos à saúde e, portanto, independe do padrão de qualidade em vigor. A classificação da qualidade do ar em relação ao índice de MP_{10} é feita da seguinte forma: boa ($0-50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), moderada ($> 50-100 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ruim ($> 100-150 \mu\text{g}/\text{m}^3$), muito ruim ($> 150-250 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e péssima ($> 250 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Na presente pesquisa, quando a maior média de 24 h entre as oito estações foi igual ou inferior a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a classificação foi considerada como “boa” em termos de efeitos à saúde. Caso contrário, a classificação foi definida como “não boa” (moderada, ruim, muito ruim e péssima).

Como a regressão logística simples considera a variável dependente como dicotômica (*dummy*), a concentração de MP_{10} (maior média de 24 h entre as oito estações) foi transformada em uma variável *dummy*, apresentando a seguinte classificação: um (1), para classificação “não boa” (qualidade do ar “não boa” em termos de efeitos à saúde) e, zero (0), para “boa”.



Figura 1 - Estações de monitoramento da qualidade do ar na Grande Vitória. Fonte: Google Earth (2014).

Para verificar os efeitos sobre a qualidade do ar em relação à concentração de MP₁₀, na RGV, foram consideradas, primeiramente, as variáveis meteorológicas temperatura (TEMP), umidade relativa (UMID), velocidade do vento (VELVENT) e precipitação pluviométrica (PREC). Em complemento, verificou-se os efeitos de cada dia da semana e de cada estação do ano na probabilidade de qualidade do ar “não boa”. Para representar os dias da semana foram criadas sete variáveis binárias (*dummies*) e para as estações do ano quatro variáveis binárias.

2.2. Modelo Logit

Para verificar a influência das variáveis predictoras na probabilidade de ocorrência de qualidade do ar “não boa”, foi utilizado o modelo Logit simples (Gujarati e Porter, 2008), que admite valores discretos, zero e um (variável binária), para a variável dependente. Um dos principais objetivos dos modelos de resposta binária é calcular a probabilidade de um dado evento, com determinado conjunto de atributos, de fato acontecer.

No modelo Logit utiliza-se uma função de distribuição acumulada logística, dada por:

$$L(\mathbf{X}, \boldsymbol{\beta}) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_{ii})}} \tag{1}$$

em que, L representa a função de distribuição logística; \mathbf{X} , matriz de variáveis explicativas; $\boldsymbol{\beta} = \{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k\}$, vetor de parâmetros a serem estimados; e , base do logaritmo natural; e, $t = 1, \dots, n$ (número de observações).

A ocorrência ou não de uma classificação “não boa” da qualidade do ar depende de vários fatores. Como os parâmetros dessa ocorrência não são observáveis para cada ponto do tempo t , pode-se definir uma variável latente ou não observada, Y_t^* , como

$$Y_t^* = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_{ti} + \mu_t \tag{2}$$

em que Y_t^* é variável latente; μ_t , erro aleatório (para detalhes ver Gujarati e Porter, 2008).

A ocorrência de uma determinada classificação pode ser descrita pela variável binária, Y_t , tal que $Y_t = 1$, se a classificação é “não boa” e, $Y_t = 0$, se é “boa”. Esses valores observados de Y_t estão relacionados com Y_t^* , como segue:

$$Y_t = 1, \text{ se } Y_t^* > 0; \text{ e, } Y_t = 0, \text{ se } Y_t^* \leq 0, \\ Prob(Y_t = 1) = Prob(Y_t^* > 0) = \\ Prob(\mu_t > -(\beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_{ti})) \tag{3}$$

$$Prob(Y_t = 0) = Prob(Y_t^* \leq 0) = \\ Prob(\mu_t \leq -(\beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_{ti})) \tag{4}$$

Os parâmetros do modelo são estimados pelo Método de Máxima Verossimilhança. A probabilidade de ocorrência da classificação “não boa” (a) e a probabilidade de ocorrência da classificação “boa” (b) podem ser calculadas pelas seguintes expressões:

$$\begin{aligned} \text{a) } P_t &= \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_{ti})}} \\ \text{e} & \\ \text{b) } 1 - P_t &= \frac{e^{-(\beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_{ti})}}{1 + e^{-(\beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_{ti})}} \end{aligned} \quad (5)$$

sendo P_t igual a probabilidade de ocorrência da classificação “não boa”; e $1 - P_t$, probabilidade de ocorrência da classificação “boa”.

Para determinar o efeito marginal de cada variável preditora, sobre a probabilidade de ocorrência da classificação “não boa”, é necessário usar os valores médios das variáveis explicativas. O efeito marginal da variável X_{ti} sobre a variável dependente é descrito pela expressão:

$$\frac{\partial P_t}{\partial X_{ti}} = \beta_i \times \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_{ti})}} \times \frac{e^{-(\beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_{ti})}}{1 + e^{-(\beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_{ti})}} \quad (6)$$

Como já mencionado, \mathbf{X} representa a matriz de variáveis explicativas. Assim, em função dos objetivos desta pesquisa, pode-se dividir \mathbf{X} em três grupos:

1) \mathbf{X} igual as variáveis meteorológicas: aqui, \mathbf{X} foi representado pelas variáveis contínuas temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação pluviométrica. Estimou-se uma equação para captar o efeito dessas variáveis sobre a probabilidade de ocorrência de qualidade do ar “não boa”;

2) \mathbf{X} igual aos dias da semana (domingo, segunda, terça, quarta, quinta, sexta e sábado): nesse caso, foram criadas sete variáveis binárias (*dummies*), sendo uma para cada dia da semana. Para exemplificar, considere que X_{ti} refere-se ao dia de domingo. Assim, $X_{ti} = 1$, se domingo e, $X_{ti} = 0$, caso contrário. Lembrando que foi estimada uma regressão logística para cada dia da semana, perfazendo um total de sete regressões;

3) \mathbf{X} igual às estações do ano (primavera, verão, outono e inverno): aqui, adotou-se quatro variáveis binárias (*dummies*), sendo uma para cada estação do ano. Exemplificando, suponha que X_{ti} é a estação do inverno. Logo, $X_{ti} = 1$, se inverno e, $X_{ti} = 0$, caso contrário. Ressalta-se que foi estimada uma regressão logística para cada estação do ano, totalizando quatro regressões.

3. Resultados e Discussões

3.1. Aspectos gerais das variáveis

Na Tabela 1 são apresentadas as estatísticas descritivas das variáveis: concentrações de MP_{10} , temperatura (TEMP), umidade relativa (UMID), velocidade do vento (VELVENT) e precipitação pluviométrica (PREC). Em geral, observando-se os desvios-padrão e as diferenças entre os máximos e mínimos, nota-se que as variáveis apresentaram grande dispersão em termos estatísticos, exceção feita à temperatura, que climatologicamente não varia muito na RGV (IEMA, 2014). Especificamente em relação às concentrações de MP_{10} (maior média de 24 h entre as oito estações), observa-se que, em média, as concentrações não ultrapassaram o valor de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. No entanto, nota-se um desvio-padrão relativamente alto, o que demonstra que, um intervalo de confiança de um desvio padrão em relação à média teria um limite superior maior que $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, gerando uma classificação do ar “não boa”. Além disso, os resultados revelam que o valor máximo foi mais do que o dobro do valor médio, demonstrando a grande variabilidade das concentrações máximas de MP_{10} na RGV.

A Fig. 2 demonstra a evolução das concentrações de MP_{10} (maior média de 24 h entre as oito estações) no período de análise deste estudo, que foi de janeiro de 2005 a dezembro de 2010, perfazendo um total de 2.191 observações (dias). Desse total, cerca de 34% dos dias apresentou concentrações superiores a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, o que dá origem à uma classificação “não boa” da qualidade do ar. Além disso, constata-se, novamente, a grande variabilidade das concentrações de MP_{10} na RGV. Vale mencionar que, levando em consideração as estações de forma individual, o maior número de concentrações superiores a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ocorreu,

Tabela 1 - Estatísticas descritivas das variáveis contínuas.

Estatística	Variáveis				
	PM_{10}	TEMP	UMID	VELVENT	PREC
Média	46,62	24,36	77,79	2,05	0,17
Mediana	44,83	24,35	77,33	1,99	0,00
Desvio-padrão	14,05	2,54	6,61	0,56	0,51
Mínimo	12,17	17,00	59,49	0,86	0,00
Máximo	117,33	30,80	97,65	5,49	6,74
Observações	2191	2191	2191	2191	2191

Fonte: elaborado a partir dos dados da pesquisa.

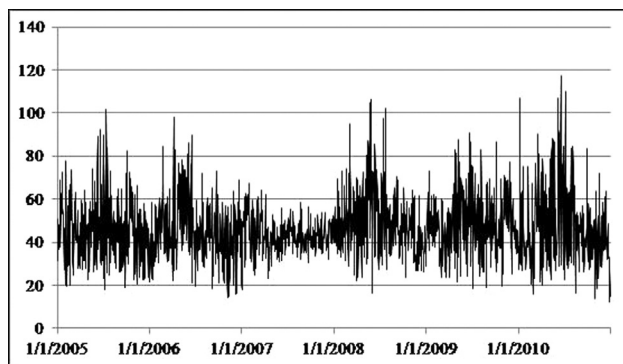


Figura 2 - Concentrações máximas diárias de MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) na RGV, de 01/01/2005 a 31/12/2010. Fonte: elaborado a partir dos dados da pesquisa.

em ordem decrescente, nas estações de Cariacica, Laranjeiras, Vila Velha – Centro, Vila Velha – Ibes, Enseada do Suá, Jardim Camburi, Carapina e Vitória – Centro. Logo, como a concentração diária de MP_{10} utilizada para as estimativas desse estudo foi a maior média de 24 h entre as oito estações, a estação de Cariacica foi a que mais contribuiu na formação da mesma. Esse resultado corrobora com a análise de tendência da concentração do MP_{10} apresentada no último relatório de qualidade do ar local. Os dados monitorados mostraram que de 2003 a 2013 a estação de Cariacica foi aquela que obteve as maiores concentrações de MP_{10} de toda a rede, apresentando uma tendência de aumento nos últimos anos (desde 2011). Todas as estações apresentaram tendência de diminuição da média de concentração anual de MP_{10} , exceto nas estações Jardim Camburi e Cariacica (Iema, 2014).

3.2. Estimativas da regressão logística

Os resultados da Tabela 2 representam a equação logística ajustada, considerando como variáveis exógenas a umidade relativa, a velocidade do vento e a precipitação. Também são apresentados os respectivos efeitos marginais de cada variável sobre a probabilidade de ocorrência de qualidade do ar “não boa”. Verifica-se que a regressão como um todo foi estatisticamente significativa (Prob/LR

estat.). Uma vez que a variável temperatura não foi estatisticamente significativa, a mesma não se encontra na Tabela 2. Vale dizer que, historicamente, a temperatura média da RGV não apresenta grandes variações ao longo do ano, o que pode justificar a não significância de tal variável. Já a umidade relativa, a velocidade do vento e a precipitação foram individualmente significantes na determinação de qualidade do ar “não boa” e os seus sinais coerentes com o esperado.

Destaca-se que, os coeficientes das variáveis explicativas, estimados pelo modelo Logit, não refletem seu efeito marginal sobre a probabilidade de ocorrência de um dado evento. Assim, para a determinação do efeito marginal foram usados os valores médios das variáveis preditoras, de acordo com a Eq. (6). Nota-se que, o maior efeito marginal ocorreu para variável precipitação pluviométrica, seguido, respectivamente, por velocidade do vento e umidade relativa. Ressalta-se, ainda, que o efeito marginal da umidade foi muito pequeno.

Para a variável precipitação, por exemplo, o efeito marginal, igual a $-0,2368$, significa que, o aumento de um milímetro (1 mm) na precipitação média diária na região ocasionou uma redução na probabilidade de qualidade do ar “não boa” de 23,68 pontos percentuais. Importante mencionar os elevados efeitos marginais negativos das variáveis velocidade do vento e precipitação. Isso indica que maiores velocidades do vento e altos volumes de chuvas contribuíram fortemente para redução da probabilidade de ocorrência de qualidade do ar classificada como “não boa”, na RGV, uma vez que contribuem para a maior dispersão e diluição de poluentes.

Destaca-se que, conforme o Inventário de Fontes de Emissões Atmosféricas da Região da Grande Vitória, a principal fonte emissora de partículas na RGV são veículos automotores, especialmente as emissões ligadas à ressuspensão de partículas já depositadas nas vias (Ecosoft, 2011). Dessa forma, a grande importância da variável precipitação na redução das concentrações de MP_{10} pode estar relacionada ao processo de deposição úmida e a redução da ressuspensão de poeira do solo.

Tabela 2 - Equação logística considerando as variáveis umidade relativa, velocidade do vento e precipitação e seus efeitos marginais.

Variáveis	Coefficientes	Erro-padrão	Valor de Z	Valor-p	Efeito marginal
C	6,2674***	0,9145	6,8533	0,0000	-
UMID	-0,0658***	0,0103	-6,3960	0,0000	-0,0141
VELVENT	-0,8526***	0,1052	-8,1016	0,0000	-0,1833
PREC	-1,1015***	0,2500	-4,4054	0,0000	-0,2368
Obs. com variável dependente = 0	1454				
Obs. com variável dependente = 1	737				
Prob. (LR estat.)	0,0000				
Total de observações	2.191				

Fonte: elaborado a partir dos dados da pesquisa.

Nota: 1) *** Significativo a 1%; e, 2) As estimativas foram realizadas utilizando o método de covariância robusta GLM (Modelo Linear Generalizado).

Vale ressaltar que, em relação ao coeficiente negativo da velocidade do vento, de acordo com Kukkonen *et al.* (2005), mesmo que o esperado seja que ventos fortes dissipem a poluição do ar gerada localmente, também pode haver aumento dos níveis de MP_{10} , sob certas condições meteorológicas, em função da ressuspensão de poeira do solo e de estradas. Segundo Vardoulakis e Kassomenos (2008), esse efeito ocorre com maior frequência em dias quentes e secos.

Referente ao coeficiente da variável umidade, embora pequeno, ele foi estatisticamente significativo, indicando que tal variável contribuiu para a redução das concentrações de MP_{10} na RGV. Como mencionado por Vardoulakis e Kassomenos (2008) e Lyra *et al.* (2011), em dias em que a umidade é alta, a tendência é de diminuição da ressuspensão do solo para o poluente MP_{10} , especialmente quando as velocidades dos ventos são baixas. Lembrando que a ressuspensão de poeira do solo é a principal fonte de emissão de partículas da RGV, segundo o inventário oficial do órgão ambiental.

A fim de enriquecer o trabalho, também foram estimadas regressões logísticas para cada dia da semana e para cada estação do ano (primavera, verão, outono e inverno). A partir dessas equações foram calculados os respectivos efeitos marginais. Na Tabela 3 são demonstradas as estimativas das equações logísticas quando considerados os dias da semana (foi estimada uma equação para cada dia),

assim como o efeito marginal relativo à cada dia. Como o dia de segunda-feira não foi significativo estatisticamente, o mesmo não foi apresentado. Observa-se que, nos dias relativos à terça, quarta, quinta e sexta-feira, a probabilidade de ocorrência de qualidade do ar “não boa” foi muito maior do que nos fins de semana (domingo e sábado). No domingo, por exemplo, a chance de qualidade do ar “não boa” reduziu-se em 15,44 pontos percentuais. Já na sexta-feira, a probabilidade de ocorrência de uma qualidade do ar “não boa” aumentou em 9,61 pontos percentuais.

Conforme o Inventário de Fontes de Emissões Atmosféricas da Região da Grande Vitória (Ecosoft, 2011), em segundo lugar na lista dos grupos mais importantes para a emissão de partículas na RGV está o setor industrial minero-siderúrgico. Em terceiro lugar encontra-se o setor logístico, que inclui portos e aeroportos (o inventário não contempla as atividades da construção civil). Logo, pode-se dizer que a menor probabilidade de ocorrência de qualidade do ar “não boa” nos fins de semana já era esperada, uma vez que aos sábados e domingos ocorre redução da produção industrial, dos serviços de logística e diminuição da circulação de veículos.

Por fim, a Tabela 4 traz os resultados das estimativas das equações logísticas quando consideradas as estações do ano (foi estimada uma equação para cada estação), assim como o efeito marginal relativo à cada estação. Todas as estações do ano foram estatisticamente significativas.

Tabela 3 - Equações logísticas e efeitos marginais para cada dia da semana.

Variáveis	Coefficientes	Erro-padrão	Valor de Z	Valor-p	Efeito marginal
Domingo					
C	-0,5342***	0,0478	-11,173	0,0000	-0,1544
DOM	-1,3030***	0,1710	-7,6196	0,0000	
Terça					
C	-0,9786***	0,0518	-18,897	0,0000	0,0588
TER	0,2663**	0,1310	2,0330	0,0421	
Quarta					
C	-0,9786***	0,0518	-18,897	0,0000	0,0588
QUAR	0,2663**	0,1310	2,0330	0,0421	
Quinta					
C	-0,9894***	0,0519	-19,058	0,0000	0,0752
QUIN	0,3343**	0,1300	2,5722	0,0101	
Sexta					
C	-1,0029***	0,0521	-19,258	0,0000	0,0961
SEX	0,4181***	0,1289	3,2436	0,0012	
Sábado					
C	-0,9022***	0,0509	-17,715	0,0000	-0,0488
SAB	-0,2702*	0,1424	-1,8971	0,0578	

Fonte: elaborado a partir dos dados da pesquisa.

Nota: 1) *** Significativo a 1%, ** Significativo a 5%, * Significativo a 10%; e, 2) As estimativas foram realizadas utilizando o método de covariância robusta GLM.

Tabela 4 - Equações logísticas e efeitos marginais para cada estação do ano.

Variáveis	Coefficientes	Erro-padrão	Valor de Z	Valor-p	Efeito marginal
Primavera					
C	-0,8413***	0,0536	-15,693	0,0000	-0,0733
PRIM	-0,4283***	0,1172	-3,6554	0,0003	
Verão					
C	-0,8370***	0,0535	-15,650	0,0000	-0,0768
VER	-0,4536***	0,1181	-3,8405	0,0001	
Outono					
C	-0,8238***	0,0538	-15,326	0,0000	0,1310
OUT	0,5351***	0,1010	5,2958	0,0000	
Inverno					
C	-0,6238***	0,0438	-14,258	0,0000	0,1588
INV	0,6351***	0,0501	12,6750	0,0001	

Fonte: elaborado a partir dos dados da pesquisa.

Nota: 1) *** Significativo a 1%; e, 2) As estimativas foram realizadas utilizando o método de covariância robusta GLM.

Como era esperado, os coeficientes da primavera e do verão foram negativos e os do outono e do inverno positivos, indicando que nos períodos de temperaturas mais baixas, com menores volumes de chuva, a chance de ocorrência de qualidade do ar “não boa” aumentou. No inverno, por exemplo, o efeito marginal igual a 0,1588 demonstra que nesta estação a probabilidade de uma qualidade do ar “não boa” elevou-se em 15,88 pontos percentuais, ao passo que no verão houve uma redução de 7,68 pontos percentuais nessa probabilidade.

4. Conclusões

Esse trabalho teve como objetivo verificar os impactos das variáveis meteorológicas temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação sobre a qualidade do ar, na RGV, considerando o poluente MP₁₀, por meio do modelo Logit. Para isto, a qualidade do ar, no que se refere ao MP₁₀, foi classificada como “não boa” e “boa”. Também foram estimados os efeitos dos dias da semana e das estações do ano sobre a probabilidade de ocorrência de qualidade do ar “não boa”.

Os resultados revelaram que fatores meteorológicos como a precipitação pluviométrica e a velocidade do vento contribuíram significativamente para a redução da probabilidade de ocorrência de qualidade do ar “não boa”. Observou-se, também, que, nos finais de semana, quando a produção industrial diminui, reduz-se os serviços logísticos e o fluxo de carros é menor, a chance de ocorrer qualidade do ar “não boa” foi fortemente reduzida, quando comparado aos dias de semana. Além disso, notou-se que nas estações do outono e do inverno a probabilidade de se verificar qualidade do ar “não boa” caiu de maneira relevante, sendo que na primavera e no verão notou-se uma elevação desta probabilidade.

Por fim, vale destacar que, as preocupações referentes à poluição do ar vêm aumento ao longo do tempo, dado que, cada vez mais, a poluição tem afetado a saúde humana, a fauna e a flora. Dessa forma, este estudo visa contribuir na tomada de decisões dos agentes públicos no que diz respeito ao combate à poluição, à prevenção de altas concentrações e à formulação de legislações para esse fim.

Referências

- BRUNEKREEF B.; HOLGATE, S.T. Air pollution and health. *Lancet*, v. 360, n. 9341, p. 1233-1242, 2002.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Relatório de Qualidade do ar no Estado de São Paulo 2014**. São Paulo, 2014. Disponível em: <http://ar.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-relatorios/>. Acessado em: 25 de ago. de 2014.
- CURTIS, L.; REA, W.; SMITH-WILLIS, P.; FENYVES, E.; PAN, Y. Adverse health effects of outdoor air pollutants. *Environment International*, v. 32, n. 6, p. 815-830, 2006.
- ECOSOFT CONSULTORIA E SOFTWARES AMBIENTAIS. **Inventário de emissões atmosféricas da Região da Grande Vitória**. Vitória, 2011. Disponível em: <http://www.es.gov.br/Banco%20de%20Documentos/PDF/Maio/100511/RTC10131-R1.pdf>. Acessado em: 20 de mar. de 2014.
- GEHRING, U.; GRUZIEVA, O.; AGIUS, R.M.; BEELEN R.; CUSTOVIC, A. *et al.* Air pollution exposure and lung function in children: the escape project. *Environmental Health Perspectives*, v. 121, n. 11-12, p. 1357-1364, 2013.
- GENT, J.F.; TRICHE, E.W.; HOLFORD, T.R.; BELANGER, K.; BRACKEN, M.B.; BECKETT, W.S.; LEADERER, B.P. Association of low-level ozone and fine particles with respiratory symptoms in children with asthma. *American Medical Association*, v. 8, n. 14, p. 1859-1867, 2003.
- GOOGLE EARTH. **Informações geográficas**. 2014. Disponível em: <http://www.google.com.br/intl/pt-PT/earth/>. Acessado em: 20 de mar. de 2014.

- GRAMSCH, E.; CERECEDA-BALIC, F.; OYOLA, P.; VON BAER, D. Examination of pollution trends in Santiago de Chile with cluster analysis of PM₁₀ and ozone data. **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 28, p. 5464-5475, 2006.
- GUJARATI, D.N.; PORTER, D.C. **Basic Econometrics**. 5 ed. New York: McGraw-Hill/Irwin, 2008. 944 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2014. **Banco de dados. Cidades@**. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>. Acessado em: 20 de mar. de 2014.
- INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Relatório da qualidade do ar da Região da Grande Vitória**. Vitória, 2013. Disponível em: <http://www.meioambiente.es.gov.br>. Acessado em: 27 de jun. de 2015.
- KUCHENHO, H.; THAMERUS, M. Extreme value analysis of Munich air pollution data. **Environmental and Ecological Statistics**, v. 3, n. 2, p. 127-141, 1996.
- KUKKONEN, J.; POHJOLA, M.; SOKHI, R.S.; LUHANA, L.; KITWIROON, N. *et al.* Analysis and evaluation of selected local-scale PM₁₀ air pollution episodes in four European cities: Helsinki, London, Milan and Oslo. **Atmospheric Environment**, v. 39, p. 2759-2773, 2005.
- LEITE, R.C.M.; GUIMARÃES, E.C.; LIMA, E.A.R.L.; BARROZO, M.A.S.B.; TAVARES, M. Utilização de regressão logística simples na verificação da qualidade do ar atmosférico de Uberlândia. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 175-180, 2011.
- LIU, P. W.G.; JOHNSON, R. Forecasting peak daily ozone levels-I. A regression with time series errors model having a principal component trigger to fit 1991 ozone levels. **Journal of the Air & Waste Management Association**. v. 52, n. 9, p.1064-1074, 2002.
- LIU, P.W.G.; TSAI, J.H.; LAI, H.C.; TSAI, D.M.; LI, L.W. Establishing multiple regression models for ozone sensitivity analysis to temperature variation in Taiwan. **Atmospheric Environment**, v. 79, p. 225-235, 2013.
- LYRA, G.B.; ODA-SOUZA, M.; VIOLA, D.N. Modelos lineares aplicados à estimativa da concentração do material particulado (MP₁₀) na cidade do Rio de Janeiro, RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 3, p. 392-400, 2011.
- MAYNARD, R. Key airborne pollutants: the impact on health. **Science of the Total Environment**, v. 334-335, p. 9-13, 2004.
- MOREIRA, D.M.; TIRABASSI, T.; MORAES, M.R. Meteorologia e poluição atmosférica. **Ambiente e Sociedade**. v. 11, n. 1, p. 1-13, 2008.
- OLTMANS, S.J.; LEFOHN, A.S.; HARRIS, J.M.; GALBALLY, I.; SCHEEL, H. E. *et al.* Long-term changes in tropospheric ozone. **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 17, p. 3156-3173, 2006.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). **Air and Radiation – Air Pollutants**. 2014. Disponível em: <http://www.epa.gov/air/>. Acessado em: 24 mar. 2014.
- VARDOULAKIS, S.; KASSOMENOS, P. Sources and factors affecting PM₁₀ levels in two European cities: implications for local air quality management. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 17, p. 3949–3963, 2008.
- VINGARZAN, R. A review of surface ozone background levels and trends. **Atmospheric Environment**, v. 38, n. 21, p. 3431-3442, 2004.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Air pollution estimates**. 2014. Disponível em: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/FINAL_HAP_AAP_BoD_24March2014.pdf?ua=1. Acessado em: 26 de mar. 2014.
- _____. **WHO air quality guidelines global update 2005**. Report on a working group meeting, Bonn/Germany, 18-20 October 2005, 2005. Disponível em: http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0008/147851/E87950.pdf. Acessado em: 20 de mar. de 2014.