

X-019 - ANÁLISE DAS RELAÇÕES ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE OZÔNIO E DE DIÓXIDO DE NITROGÊNIO NA REGIÃO DA GRANDE VITÓRIA, ESPÍRITO SANTO, POR MEIO DA ABORDAGEM VETORIAL AUTORREGRESSIVA (VAR)

Edson Zambon Monte⁽¹⁾

Doutorando em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Professor do Departamento de Economia, da UFES.

Taciana Toledo de Almeida Albuquerque

Doutora em Meteorologia pela Universidade Federal de São Paulo (USP). Professora do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, da UFES.

Valdério Anselmo Reisen

Doutor em Estatística pela University of Manchester Institute of Science And Technology. Professor do Departamento de Estatística e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, da UFES.

Wanderson de Paula Pinto

Doutorando em Engenharia Ambiental pela UFES. Professor da Faculdade da Região Serrana (FARESE).

Endereço⁽¹⁾: Avenida Fernando Ferrari, Departamento de Economia, nº 514, Goiabeiras, Vitória, ES, Brasil, CEP: 29075-910. E-mail: edsonzambon@yahoo.com.br.

RESUMO

Este trabalho objetivou verificar as inter-relações entre as concentrações de ozônio (O₃) e de dióxido de nitrogênio (NO₂), na região da Grande Vitória, Espírito Santo, Brasil. Adotou-se a metodologia VAR e o teste de causalidade de Granger. Os resultados revelaram que as concentrações de O₃ e de NO₂ da região (estação) de Laranjeiras foram as menos afetadas por concentrações de outras estações. Dada à localização, as concentrações de O₃ e NO₂ da Enseada do Suá tiveram significativa influência de outras regiões, especialmente de Jardim Camburi, Ibes e de Vitória – Centro. A concentração de ozônio na região do Ibes foi fortemente influenciada pelas concentrações de O₃ e de NO₂ da Enseada do Suá. Além disso, as concentrações de Cariacica sofreram impactos relevantes das concentrações da Enseada do Suá, provavelmente devido à direção do vento Nordeste, predominante na Grande Vitória.

PALAVRAS-CHAVE: Ozônio, Poluição do Ar, Séries Temporais, Vetores Autorregressivos.

INTRODUÇÃO

O processo de industrialização, aliado ao grande crescimento populacional ocorrido nas últimas décadas, vem aumentando as preocupações relacionadas à proteção do meio ambiente. Neste contexto, cada vez mais tem se dado atenção para os efeitos adversos que a poluição atmosférica pode causar à fauna, à flora e, também, à saúde humana (tais como: irritação dos olhos, problemas pulmonares, alergias, etc.). Liu *et al.* (2013) consideram que os dois poluentes do ar que mais preocupam em relação à saúde humana são o ozônio (O₃)¹ e o material particulado.

Quanto ao ozônio, este é um poluente secundário formado na troposfera, por meio de reações fotoquímicas sobre os óxidos de nitrogênio e os compostos orgânicos voláteis. De acordo com Holgate *et al.* (1999), o processo de conversão do óxido nítrico (NO) em dióxido de nitrogênio (NO₂) é um fator fundamental na formação fotoquímica do ozônio, em regiões urbanas poluídas. Segundo Seinfeld e Pandis (2006), a formação do ozônio depende de diversos fatores químicos e físicos, que variam no espaço e no tempo de forma não linear. Como os hidrocarbonetos são emitidos por fontes naturais e antropogênicas, sendo que estas últimas

¹ Vale ressaltar que os males causados pelo ozônio ocorrem na faixa de ar perto da superfície terrestre (onde o gás é muito tóxico). Conforme Seinfeld e Pandis (2006), o ozônio apresenta um duplo paradoxo na atmosfera, pois, o mesmo tem um papel benéfico na estratosfera e maléfico na troposfera.

incluem fontes móveis (automóveis) e estacionárias (usos industriais), a concentração de ozônio tende a ser maior nos grandes centros urbanos. Cabe destacar que, conforme Orlando (2008), também ocorrem reações em que o óxido nítrico reage com o ozônio dando origem ao dióxido de nitrogênio.

Vale dizer que, dadas as suas características, os fatores meteorológicos têm importante papel na formação do ozônio. Ryan, Piety e Luebehusen (1999) destacaram que a radiação ultravioleta tem papel fundamental na formação de O₃. Moreira, Tirabassi e Moraes (2008) descreveram que as condições meteorológicas desempenham papel relevante na dispersão ou acumulação de poluentes. Já Liu e Johnson (2002) salientaram que a poluição do ar, particularmente a concentração de ozônio, é altamente correlacionada no tempo, estando associada, geralmente, a fatores como temperatura, umidade relativa, velocidade e direção do vento, dentre outros. Conforme Liu *et al.* (1980), dependendo da estação e da latitude, o tempo de vida do ozônio pode variar desde alguns dias até um mês.

De acordo com Carvalho (2006), a formação secundária do ozônio faz com que, para este poluente, as modelagens estatísticas sejam mais complexas do que para outros poluentes. No entanto, a natureza da concentração de ozônio tem sido abordada por vários estudos estatísticos, tais como: Ryan (1995); Jorquera *et al.* (1998); Liu e Johnson (2002); Liu e Johnson (2003); dentre outros. Porém, nota-se que não é comum à adoção da abordagem vetorial autorregressiva (VAR) e de testes de causalidade, para a modelagem da concentração de poluentes, especialmente de ozônio, sendo que essas metodologias podem verificar de melhor forma as inter-relações entre as variáveis que dão origem à determinado poluente.

No que tange à adoção da modelo VAR, pode-se citar o estudo de Hsu (1992), que verificou a interdependência entre os poluentes O₃, NO e NO₂, na cidade de Taipei, Taiwan. Cai (2008), que analisou a associação entre a concentração mensal de monóxido de carbono e as variáveis, precipitação, temperatura, radiação solar e tráfego de veículos, na costa sul da Califórnia, Estados Unidos. E, Wang e Niu (2009), que aplicaram a técnica VAR para avaliar a associação entre a concentração mensal de material particulado fino (PM_{2,5}) e as variáveis tráfego de veículos, velocidade do vento, temperatura, temperatura do solo e pontos de orvalho, na região de Los Angeles/Long Beach, Estados Unidos. Quanto à utilização de testes de causalidade, tem-se o trabalho de Sfetsos e Vlachogiannis (2013), que buscaram, por meio do teste de causalidade de Granger, verificar as relações de causa entre a concentração de ozônio e variáveis como temperatura e óxido de nitrogênio, na região de Atenas, Grécia.

Assim, este trabalho objetivou analisar as inter-relações entre as concentrações de ozônio e de dióxido de nitrogênio, por meio da abordagem vetorial autorregressiva (VAR), complementada pelo teste de causalidade de Granger, na região da Grande Vitória, Espírito Santo, Brasil, no período de janeiro a dezembro de 2010.

Ressalta-se que, mesmo não tendo ultrapassado os padrões primário e secundário (160 µg/m³) estabelecidos pela Resolução CONAMA 03, de 1990, no período de estudo, em diversos momentos as concentrações de ozônio e de dióxido de nitrogênio ultrapassaram o valor de 80 µg/m³ e, até mesmo, o de 100 µg/m³. Conforme a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2013), esses níveis de concentração já podem gerar efeitos prejudiciais à saúde humana, principalmente para população mais sensível, como idosos e crianças. Logo, esta pesquisa torna-se importante no que diz respeito, especialmente, à formulação de medidas preventivas por parte dos órgãos competentes, uma vez que a concentração de ozônio, na Grande Vitória, embora não tenha atingido níveis alarmantes, tem-se elevado nos últimos anos.

MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo compreendeu a Região da Grande Vitória (RGV), 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. A RGV possui oito estações de monitoramento de qualidade do ar, a saber: Laranjeiras; Carapina; Jardim Camburi; Enseada do Suá; Vitória – Centro; Vila Velha – Ibes; Vila Velha – Centro; e, Cariacica (Figura 1).



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

As análises foram realizadas para o período de janeiro a dezembro de 2010, sendo os dados tomados de forma horária e coletados do Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA). As variáveis foram relativas às concentrações de ozônio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e de dióxido de nitrogênio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e, algumas variáveis meteorológicas (temperatura, umidade relativa e velocidade do vento), para dar maior robustez às estimativas.

A concentração de ozônio é medida nas estações de Laranjeiras (LAR), Enseada do Suá (SUA), Vila Velha – Ibes (IBES) e Cariacica (CAR). Já a concentração de dióxido de nitrogênio é monitorada nas estações de Laranjeiras (LAR); Jardim Camburi (CAMB); Enseada do Suá (SUA); Vitória – Centro (VIX); Vila Velha – Ibes (IBES); e, Cariacica (CAR). No caso da temperatura e da umidade relativa, adotou-se como referência a estação de Carapina. Quanto à velocidade do vento, calculou-se uma média entre as estações de Carapina, Enseada do Suá, Vila Velha – Ibes e Cariacica.

Adotou-se a metodologia VAR², em complemento com o teste de causalidade de Granger³, para atingir ao objetivo proposto. Pode-se expressar um modelo VAR de ordem p em função de um vetor com n variáveis endógenas, X_t , sendo que estas se conectam por meio de uma matriz A , da seguinte forma (Equação 1):

$$AX_t = B_0 + \sum_{i=1}^p B_i X_{t-i} + B\varepsilon_t, \quad (1)$$

em que: A é uma matriz $n \times n$ que define as restrições contemporâneas entre as variáveis que constituem o vetor $n \times 1$, X_t ; B_0 , vetor de constantes $n \times 1$; B_i , matrizes $n \times n$; B , matriz diagonal $n \times n$ de desvios-padrão; e, ε_t , vetor $n \times 1$ de perturbações aleatórias não correlacionadas entre si contemporânea ou temporalmente, isto é, $\varepsilon_t \sim i.i.d(0; I_n)$.

A Equação 1 expressa as relações entre as variáveis endógenas e é denominada de forma estrutural. No entanto, devido à endogeneidade das variáveis do VAR, o modelo é normalmente estimado em sua forma reduzida, dada pela Equação 2:

$$X_t = A^{-1}B_0 + \sum_{i=1}^p A^{-1}B_i X_{t-i} + A^{-1}B\varepsilon_t = \Phi_0 + \sum_{i=1}^p \Phi_i X_{t-i} + e_t, \quad (2)$$

em que: $\Phi_i = A^{-1}B_i; i = 0, 1, 2, \dots, p$; e, $B\varepsilon_t = Ae_t$.

² Metodologia desenvolvida inicialmente por Sims (1980).

³ Para detalhes do teste de causalidade de Granger consultar Gujarati (2008). O teste de causalidade de Granger objetiva verificar a relação de causalidade existente entre duas variáveis.

A metodologia VAR pode ser estimada por meio do método de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), levando-se em conta, principalmente, a interação entre as variáveis do sistema considerado. Dentre as suas principais vantagens na análise econométrica está a obtenção das funções de impulso-resposta (FRI).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro passo na análise de séries temporais é verificar se as mesmas são estacionárias. Os resultados dos testes *Augmented Dickey-Fuller* – ADF (Dickey e Fuller, 1981), *Phillips-Perron* – PP (Phillips e Perron, 1988) e, *Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin* – KPSS (Kwiatkowski *et. al.*, 1992)⁴ demonstraram que todas as séries utilizadas neste pesquisa foram estacionárias em nível.

Além disso, os critérios do Erro de Previsão Final (FPE), de Akaike (AIC), de Schwarz (SC) e de Hannan-Quinn (HQ) revelaram um modelo VAR ideal com 26 defasagens. Esse apresentou todas as raízes do polinômio dentro do círculo unitário, satisfazendo a condição de estabilidade do VAR. Os resultados foram satisfatórios para não autocorrelação e ausência de heterocedasticidade. O teste de Jarque-Bera rejeitou a hipótese nula de que os resíduos são normais. Isto já era esperado, devido à assimetria das variáveis. Entretanto, assumiu-se, pela teoria assintótica sobre a média das distribuições de probabilidade, a hipótese de que os resíduos são normais, dando seguimento a análise do modelo.

Finalizada a etapa de identificação do modelo, foram analisadas as funções de impulso-resposta, em conjunto com os testes de causalidade de Granger, quando necessário. Ressalta-se que, antes de estimar as funções de impulso-resposta, é fundamental identificar o ordenamento de Cholesky do modelo VAR, um dos métodos mais populares para tal finalidade. Isto porque as funções de impulso-resposta são sensíveis à ordenação das variáveis.

Esta pesquisa adotou, como método de ordenação das variáveis, o teste de causalidade de Granger (*Block Exogeneity Wald Tests*), complementado pelo que se pode denominar de método de informação *a priori* (teorias de engenharia ambiental e meteorologia, artigos, dentre outros). A ordenação adotada foi: TEMP, VELVENT, UMID, NO2LAR, NO2CAMB, O3SUA, O3LAR, NO2CAR, NO2SUA, O3CAR, NO2VIX, NO2IBES e O3IBES. Devido à importância da ordenação de Cholesky para a correta estimação das funções de impulso-resposta, testou-se outros ordenamentos (o que pode ser considerado um teste de robustez), que não alteraram significativamente tais funções.

Na Figura 2 são apresentadas as funções de impulso-resposta, considerando os efeitos de choques nas variáveis O3LAR, O3SUA, O3IBES, O3CAR, NO2LAR, NO2OCAMB, NO2SUA, NO2VIX, NO2IBES e NO2CAR, sobre as variáveis O3LAR e NO2LAR. As linhas contínuas equivalem às funções impulso-resposta e as linhas tracejadas equivalem à intervalos de confiança correspondentes a dois erros-padrão. Inicialmente, para exemplificar a análise de uma função de impulso-resposta, toma-se o caso do efeito da concentração de dióxido de nitrogênio em Laranjeiras (NO2LAR) sobre a concentração de ozônio em Laranjeiras (O3LAR).

Nota-se que uma elevação de um desvio-padrão em NO2LAR causou uma redução significativa na concentração de ozônio até a sétima hora após o choque inicial, sendo que a maior redução se deu na primeira hora. Da sétima hora a diante a tendência é de estabilidade em torno de zero (os efeitos de NO2LAR sobre O3LAR são dissipados com o tempo). Verifica-se, também, que nas primeiras horas após o choque em O3LAR não ocorreram alterações em NO2LAR. A partir da décima hora ocorreram pequenos efeitos positivos sobre NO2LAR provocados por O3LAR, o que pode representar que a acumulação de O₃ no local contribuiu para formação de NO2LAR depois da décima hora. Em complemento, ao realizar o teste de causalidade de Granger, verificou-se que existe uma causalidade bidirecional entre O3LAR e NO2LAR. Importante destacar que, conforme Seinfeld e Pandis (2006), o aumento nas concentrações de óxidos de nitrogênio (NO_x), que dão origem ao NO₂, pode resultar em acréscimos ou decréscimos dos níveis de O₃, em função da relação entre os compostos orgânicos voláteis (COVs) e o NO_x (COVs/ NO_x). Analisar estas relações não é objeto deste estudo.

⁴ Destaca-se que o teste KPSS é um teste assintótico, e que o mesmo deve ser utilizado em complemento aos demais testes de raiz unitária (Bueno, 2011). Também foram analisados os gráficos e os correlogramas (funções de autocorrelação) das séries.

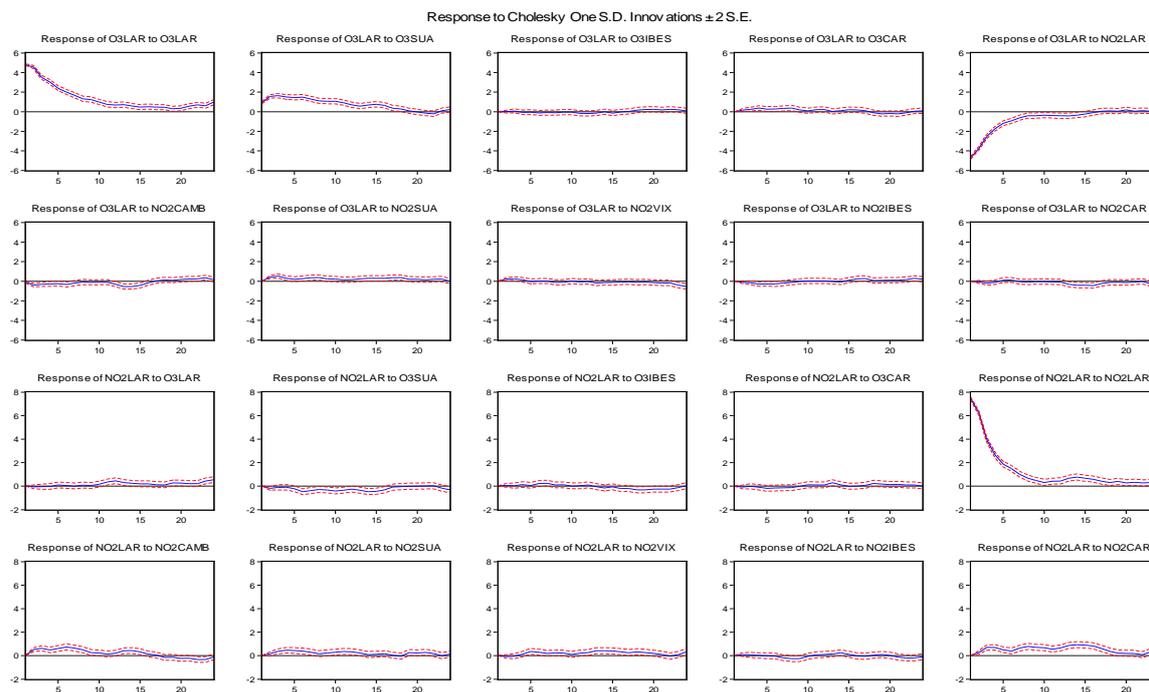


Figura 2 – Funções de impulso-resposta para as concentrações de ozônio e de dióxido de nitrogênio de Laranjeiras.

Em geral, os choques nas concentrações das outras regiões não afetaram ou afetaram muito pouco as concentrações de O3LAR e de NO2LAR, seja de forma positiva ou negativa, o que pode ser função da localização da estação de Laranjeiras, que fica ao Norte das demais regiões, quando se tem como ponto de partida a direção Norte/Nordeste (ver Figura 1). No mais, algumas relações apresentaram-se contrárias ao esperado, possivelmente devido ao grande número de variáveis no modelo estimado, ou por algum fator não captado pelo modelo ajustado. Por exemplo, os impactos positivos de O3SUA, NO2CAMB, NO2VIX e NO2CAR em NO2LAR. Neste último caso, os resultados demonstraram que NO2CAR não causou Granger⁵ NO2LAR. Para as demais situações, é importante frisar que apesar do vento Nordeste ser predominante na região da Grande Vitória, com a chegada de Frentes Frias, por exemplo, ocorrem alterações na direção do vento para Sul, Sul/Sudeste e Sul/Sudoeste, o que, dependendo da intensidade, poderia explicar os pequenos efeitos positivos de NO2CAMB, NO2SUA e NO2VIX em NO2LAR.

Os resultados da Figura 3 são relativos às funções de impulso-resposta, quando considerados os impactos de choques nas variáveis O3LAR, O3SUA, O3IBES, O3CAR, NO2LAR, NO2OCAMB, NO2SUA, NO2VIX, NO2IBES e NO2CAR, sobre as variáveis O3SUA e NO2SUA. No que se refere aos efeitos de O3SUA em NO2SUA, nota-se reduções de NO2SUA até a sexta hora, quando para os períodos seguintes a tendência é de estabilidade. Conforme observado, a variável NO2SUA não apresentou efeitos sobre O3SUA na primeira hora após o choque. A partir da primeira hora ocorreram pequenas elevações na concentração de NO2SUA. O teste de causalidade de Granger demonstrou uma causalidade bidirecional entre O3SUA e NO2SUA. Isto revela que pode haver produção e destruição local do ozônio na estação da Enseada do Suá, devido, principalmente, às reações fotoquímicas. Importante destacar que a formação do ozônio na troposfera se dá pela reação de fotólise do dióxido de nitrogênio. Entretanto, também ocorrem reações em que o óxido nítrico reage com o ozônio dando origem ao dióxido de nitrogênio (Orlando, 2008).

⁵ Neste trabalho “causou Granger” e “causou” foram considerados como sinônimos.

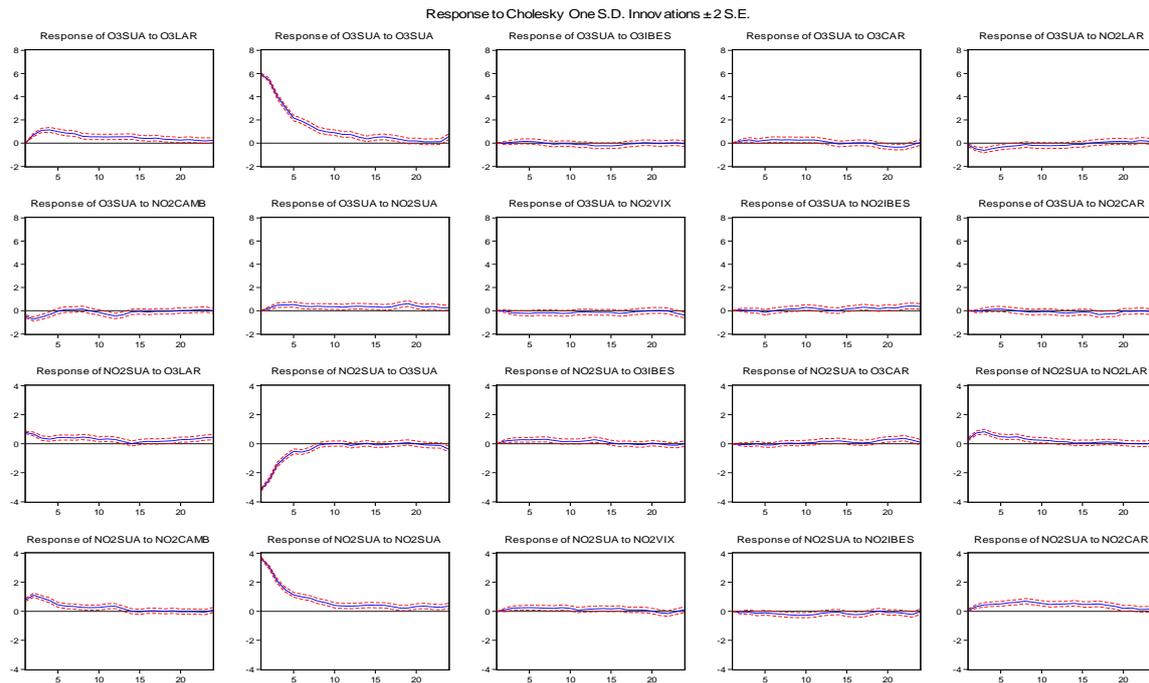


Figura 3 – Funções de impulso-resposta para as concentrações de ozônio e de dióxido de nitrogênio da Enseada do Suá.

Uma vez que, a região da Enseada do Suá está localizada em um local que pode ser considerado como central às outras regiões (ver Figura 1), as concentrações de ozônio e de dióxido de nitrogênio de outras estações afetaram consideravelmente as concentrações da Enseada do Suá. Destaca-se que tal região apresenta grande fluxo de veículos, principalmente as 6 horas e as 18 horas. Pode-se observar, por exemplo, que NO2CAMB teve efeitos positivos sobre NO2SUA nas primeiras quatro horas após o choque inicial. Isto mostra que existe um deslocamento regional de NO2 entre estas estações que pode ser resultado da direção predominante do vento na Grande Vitória (Norte/Nordeste na maioria dos meses).

Ainda, algumas variáveis não causaram efeitos sobre O3SUA e NO2SUA e certas relações podem ser consideradas como contrárias ao esperado, como a existente entre O3SUA e O3LAR. Neste particular, o teste de causalidade de Granger revelou uma causalidade entre as duas variáveis, que pode ser advinda de uma falha do modelo estimado, ou de recorrentes mudanças na direção padrão do vento na região da Grande Vitória. Não é objetivo deste trabalho analisar esses efeitos, o que pode ser aprofundado em estudos futuros. Outro resultado não esperado foi o choque positivo de NO2CAR em NO2SUA. Porém, o teste de causalidade demonstrou que NO2CAR não causou Granger NO2SUA.

Em relação à Figura 4, essa demonstra as funções de impulso-resposta, analisando-se os efeitos de choques nas variáveis O3LAR, O3SUA, O3IBES, O3CAR, NO2LAR, NO2OCAMB, NO2SUA, NO2VIX, NO2IBES e NO2CAR, sobre as variáveis O3IBES e NO2IBES. Devido à proximidade da estação da Enseada do Suá e à direção do vento em certas horas do dia, nota-se que O3SUA teve grande impacto sobre O3IBES, com pico na terceira hora, revelando a ocorrência de transporte de ozônio entre as regiões. Verifica-se, também, que choques em NO2IBES reduziram a concentração de O3IBES, principalmente até a quinta hora, demonstrando uma destruição local do ozônio quando da formação de NO2IBES.

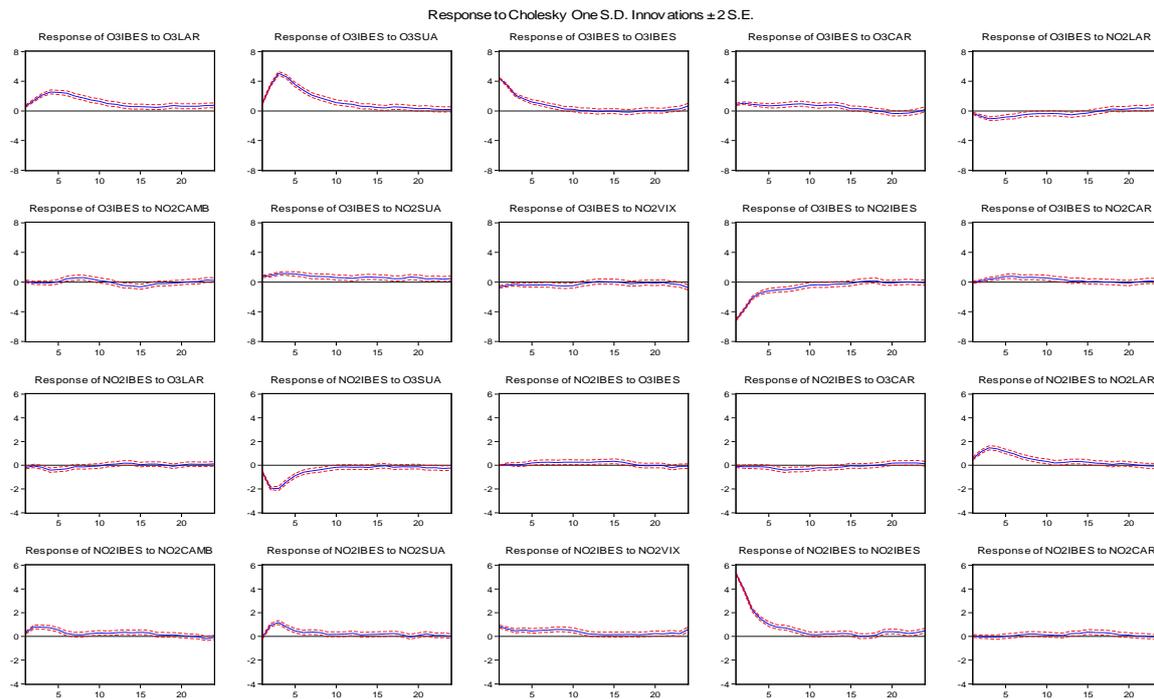


Figura 4 – Funções de impulso-resposta para as concentrações de ozônio e de dióxido de nitrogênio do Ibes.

Ainda, em relação ao transporte de poluentes entre as regiões, observa um impacto negativo relevante de O3SUA sobre NO2IBES, especialmente na segunda e terceira hora após o choque inicial em O3SUA. Isto indica que a fotólise de NO2IBES pode ter contribuído para formação de O3SUA. No mais, NO2CAMB, NO2SUA e NO2VIX contribuíram para formação da concentração de NO2IBES. Além disso, o fato de O3IBES ter influenciado positivamente NO2IBES pode ser decorrência da interação entre os locais. Como a concentração de ozônio e de dióxido de nitrogênio de outras estações afetou a concentração de O_3 e NO_2 da estação do Ibes, a formação de ozônio na região da estação Ibes não necessariamente reduz a concentração de NO_2 no local.

Ainda, em relação ao transporte de poluentes entre as estações, observa um impacto negativo relevante de O3SUA sobre NO2IBES, especialmente na segunda e terceira hora após o choque inicial em O3SUA. Isto indica que a fotólise de NO2IBES pode ter contribuído para formação de O3SUA. No mais, NO2CAMB, NO2SUA e NO2VIX contribuíram para formação da concentração de NO2IBES. Além disso, o fato de O3IBES ter influenciado positivamente NO2IBES pode ser decorrência da interação entre as estações. Como a concentração de ozônio e de dióxido de nitrogênio de outras estações afetou a concentração de O_3 e NO_2 da estação Ibes, a formação de ozônio na região de Vila Velha Ibes não necessariamente reduz a concentração de NO_2 no local.

Algumas relações tiveram efeitos insignificantes e, mais uma vez, alguns resultados não eram esperados. Por exemplo: i) o impacto positivo de O3CAR em O3IBES. O teste de causalidade de Granger revelou que O3CAR não causou O3IBES; ii) o efeito negativo de NO2LAR em O3IBES. O teste de causalidade foi realizado e constatou-se que NO2LAR não causou Granger O3IBES; iii) o impacto positivo (na maior parte do período de 24 horas) de NO2LAR em O3IBES. Também se encontrou não causalidade de NO2CAR para com O3IBES; iv) e, efeitos positivos de NO2LAR em NO2IBES. Verificou-se não causalidade de Granger de NO2LAR para NO2IBES.

Por fim, na Figura 5 são apresentados os resultados referentes às funções de impulso-resposta, levando-se em conta os impactos dos choques em O3LAR, O3SUA, O3IBES, O3CAR, NO2LAR, NO2OCAMB, NO2SUA, NO2VIX, NO2IBES e NO2CAR, sobre O3CAR e NO2CAR. Vale ressaltar que a região de Cariacica localiza-se relativamente distante, ficando a Sudoeste das demais regiões, quando se tem como ponto de partida a

direção Norte/Nordeste (ver Figura 1), sendo esta a direção predominante do vento na maioria dos meses na Região da Grande Vitória. Um primeiro ponto a destacar é que tanto O3SUA quanto NO2SUA afetaram positivamente as concentrações de ozônio (O3CAR) em Cariacica, o que parece bastante plausível, dada a direção do predominante do vento na Região da Grande Vitória.

Destaca-se que o aumento da concentração de ozônio na estação da Enseada do Suá causou redução na concentração de dióxido de nitrogênio em Cariacica. Isto significa que, com as reações fotoquímicas produzindo mais ozônio na Enseada do Suá, uma menor concentração de dióxido de nitrogênio da Enseada do Suá foi transportada pelo vento para a região de Cariacica. Além disso, pode-se observar que o aumento de NO2SUA provocou uma elevação da concentração de NO₂ em Cariacica. Logo, as concentrações de ozônio e de dióxido de nitrogênio da Enseada do Suá parecem ter papel fundamental na formação de O₃ e NO₂ em Cariacica.

No mais, em função da direção do vento, constata-se, também, que NO2CAMB e NO2VIX tiveram efeitos positivos sobre o NO2CAR. Além disso, é possível notar que o crescimento da concentração de NO2CAR causou efeitos negativos em O3CAR até a quinta hora após o choque inicial em NO2CAR. Por fim, algumas inter-relações mostraram-se insignificantes e poucos resultados foram incoerentes, como por exemplo, O3LAR afetando NO2CAR, o que não foi rejeitado pelo teste de causalidade Granger.

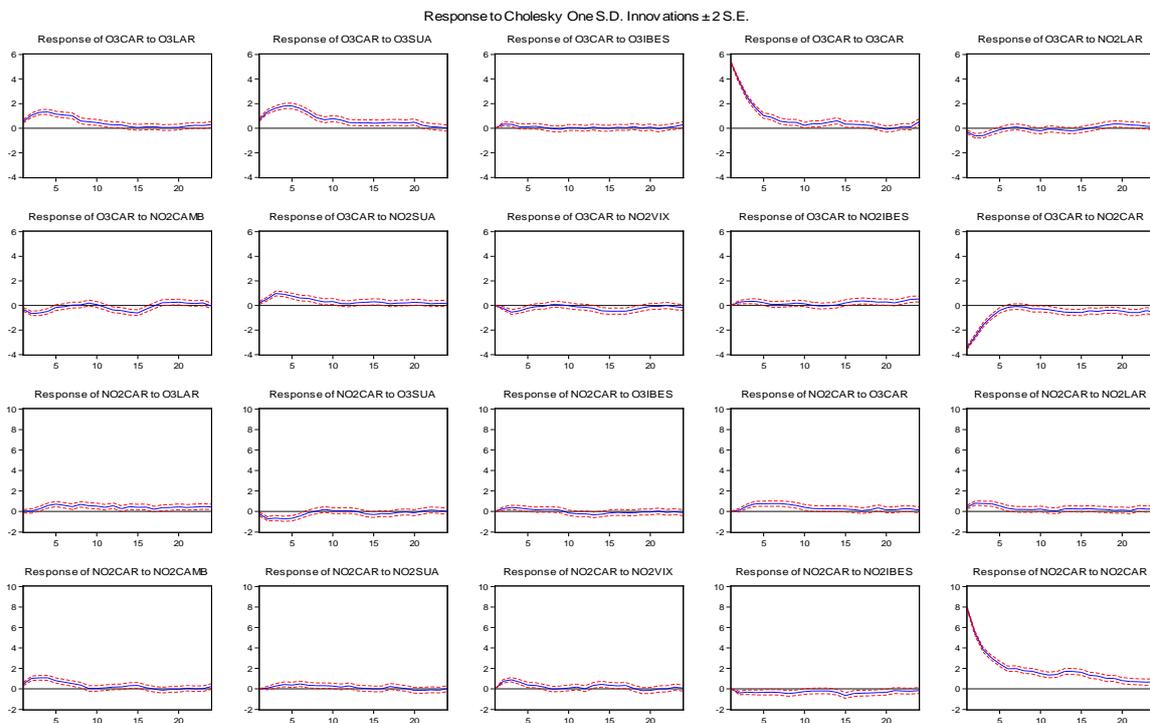


Figura 5 – Funções de impulso-resposta para as concentrações de ozônio e de dióxido de nitrogênio de Cariacica.

CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo verificar as inter-relações entre as concentrações de ozônio e de dióxido de nitrogênio, por meio da abordagem vetorial autorregressiva (VAR), complementada pelo teste de causalidade de Granger, na Região da Grande Vitória, Espírito Santo, Brasil, no período de janeiro a dezembro de 2010. Para isto, trabalhou-se com concentrações de ozônio de quatro estações e com concentrações de dióxido de nitrogênio de seis estações. Para maior robustez, as variáveis meteorológicas temperatura, umidade e velocidade do vento foram inseridas nas estimativas. As séries utilizadas foram estacionárias em nível.

Destaca-se que, mesmo sendo um poluente de difícil modelagem estatística, em função da sua formação secundária, o modelo VAR estimado apresentou todas as raízes do polinômio dentro do círculo unitário, satisfazendo a condição de estabilidade do VAR, revelou resíduos não autocorrelacionados e ausência de heterocedasticidade. Os resíduos não seguiram distribuição normal. Além disso, apesar de apresentar algumas inconsistências em termos de relações entre as variáveis, o modelo estimado conseguiu captar de forma satisfatória as inter-relações entre as concentrações de ozônio e dióxido de nitrogênio das diversas estações de monitoramento consideradas no trabalho.

As concentrações de ozônio e dióxido de nitrogênio da estação de Laranjeiras foram as que receberam menos influência das concentrações de outras regiões e as que menos influenciaram as concentrações de outras regiões. Isto pode ser decorrência da localização da estação de Laranjeiras e da direção predominante do vento na Região da Grande Vitória, que Norte/Nordeste boa parte do ano. No entanto, vale ressaltar que parece existir pequenos efeitos de O3SUA, NO2CAMB e NO2VIX em NO2LAR. Neste caso, isto poderia ser reflexo das variações na direção do vento que ocorrem na Região da Grande Vitória ao longo do ano, especialmente devido ao posicionamento do sistema de alta pressão (ASAS) mais próximo ao continente nos meses de outono inverno, alterando-se de Nordeste para Sul, Sul/Oeste e Sul/Sudoeste. Entretanto, análises mais profundas são necessárias, como por exemplo, a comparação de modelos VAR para períodos do ano com em que a ASAS se encontra sobre o oceano Atlântico favorecendo os ventos de Norte/Nordeste e quando este sistema se desloca para o continente alterando as direções predominantes para Oeste/Sul.

Pela localização mais centralizada da estação da Enseada do Suá em relação às outras estações de monitoramento, as concentrações de ozônio e dióxido de nitrogênio da mesma tiveram significativa influência de outras regiões (estações), especialmente, das estações de Jardim Camburi, Ibes e Vitória – Centro. Pela predominância do vento ser Nordeste, há forte transporte de NO₂ de Jardim Camburi para a região da Enseada do Suá. Ressalta-se que a região da Enseada do Suá apresenta grande fluxo de veículos durante alguns horários do dia. Para algumas inter-relações que *a priori* são incoerentes com o esperado, caberiam análises mais pontuais, o que não é objetivo deste estudo.

No que se refere à região da estação Ibes, os resultados revelaram que a concentração de ozônio nesta região foi fortemente influenciada pelas concentrações de ozônio e de dióxido de nitrogênio da estação Enseada do Suá. Observou-se, também, que a concentração de NO₂ na estação do Ibes foi significativamente afetada pela concentração de NO₂ das estações Jardim Camburi e Enseada do Suá. Como são regiões próximas, a tendência é ocorrer um grande transporte de poluentes entre as mesmas, o que na prática foi confirmado.

Outro ponto importante revelado pelos resultados foi a forte influência das concentrações de ozônio e de dióxido de nitrogênio da estação Enseada do Suá sobre as concentrações destes poluentes na região de Cariacica, o que comprova que a predominância do vento Nordeste na Grande Vitória contribui significativamente para o transporte dos mesmos. Até mesmo o NO₂ de Camburi contribuiu para a concentração de NO₂ em Cariacica. Mais uma vez, alguns resultados não esperados requerem maior atenção para trabalhos futuros.

Ressalta-se que, estudos desta natureza são de grande importância, uma vez que as preocupações quanto aos efeitos adversos que a poluição atmosférica pode causar na saúde humana têm aumento a cada dia. Assim, este estudo, ao demonstrar as inter-relações que existem entre as concentrações de ozônio e dióxido de nitrogênio nas diversas regiões da Grande Vitória, pode auxiliar na tomada de decisões dos agentes públicos no que diz respeito ao combate à poluição, à prevenção de altas concentrações e a formulação de legislações para este fim.

Por fim, considera-se que esta pesquisa atingiu ao objetivo proposto, ao demonstrar que existe uma inter-relação entre as concentrações de ozônio e de dióxido de nitrogênio nas estações de qualidade do ar da Região da Grande Vitória. Vale mencionar, ainda, que este é um estudo preliminar. Para trabalhos futuros outras técnicas estatísticas podem ser utilizadas para aprimorar os resultados encontrados nesta pesquisa, como os modelos multivariados com volatilidade estocástica, os modelos multivariados robustos e considerar a modelagem de memória longa (longa dependência) das séries estudadas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao IEMA pelo fornecimento das concentrações dos poluentes atmosféricos e das variáveis meteorológicas. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES) pelo suporte financeiro parcial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BUENO, R. D. L. S. *Econometria de séries temporais*. 2 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011, 338 p.
2. CAI, X. H. *Time Series Analysis of Air Pollution CO in California South Coast Area, with Seasonal ARIMA model and VAR model*. Los Angeles, California. 2008. 46 f. Thesis (Master of Science in Statistics). University of California, Los Angeles.
3. CARVALHO, V. S. B. *Meteorologia da qualidade do ar no que tange as concentrações de ozônio e dos óxidos de nitrogênio na região Metropolitana do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, RJ. 2006. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
4. CETESB. *Relatório da qualidade do ar do estado de São Paulo 2012*. São Paulo: CETESB, 2013.
5. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE – CONAMA (Brasil). *Resolução nº 08, de 6 de dezembro de 1990*. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 28 dez. 1990. Seção 1, p. 25539.
6. DICKEY, D. A.; FULLER, W. A. Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root. *Econometrica*, v. 49, n. 4, p. 1057-1073, 1981.
7. GOOGLE EARTH. *Informações geográficas*. 2014. Disponível em: <<http://www.google.com.br/intl/pt-PT/earth/>>. Acessado em: 20 de mar. de 2014.
8. GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. *Basic Econometrics*. 5 ed. New York: McGraw-Hill/Irwin, 2008. 944 p.
9. HOLGATE, S. T.; SAMET, J. M.; KOREN, H. S.; MAYNARD, R. L. *Air Pollution and Health*. London: Academic Press, 1999. 1065 p.
10. HSU, K. J. Time series analysis of the interdependence among air pollutants. *Atmospheric Environment*, v. 26B, n. 4, p. 491-503, 1992.
11. JORQUERA, H.; PÉREZ, R.; CIPRIANO, A.; ESPEJO, A.; LETELIER, M. V.; ACUÑA, G. Forecasting ozone daily maximum levels at Santiago, Chile. *Atmospheric Environment*. v. 32, n. 20, p. 3425-3424, 1998.
12. KWIATKOWSKI, D.; PHILLIPS, P. C. B.; SCHMIDT, P.; SHIN, Y. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of unit root. *Journal of Econometrics*, v. 54, n. 1, p. 159-178, 1992.
13. 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.
14. LIU, P. W. G.; JOHNSON, R. Forecasting peak daily ozone levels: part 2. A regression with time series errors model having a principal component trigger to forecast 1999 and 2002 ozone levels. *Journal of the Air & Waste Management Association*. v. 53, n. 12, p. 1472-1489, 2003.
15. 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.
16. LIU, S. C.; KLEY, D.; MCFARLAND, M.; MAHLMAN, J. D.; LEVY, H. On the origin of tropospheric ozone. *Journal of Geophysical Research*, v. 86, p. 7546-7552, 1980.
17. MOREIRA, D. M.; TIRABASSI, T.; MORAES, M. R. *Meteorologia e poluição atmosférica*. *Ambiente & Sociedade*. v. 11, n. 1, p. 1-13, 2008.
18. ORLANDO, J. P. *Estudo dos precursores de ozônio da cidade de São Paulo através de simulação computacional*. São Paulo, SP. 116 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear). Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, SP.
19. PHILLIPS, P. C. B.; PERRON, P. Testing for unit roots in time series regression. *Biometrika*, v. 75, n. 3, p. 335-346, 1988.
20. RYAN, W. F. Forecasting severe ozone episodes in the Baltimore metropolitan area. *Atmospheric Environment*, v. 29, n. 17, p. 2387-2398, 1995.
21. RYAN, W. F.; PIETY, C. A.; LUEBEHUSEN, E. D. Air quality forecasts in the Mid-Atlantic Region: current practice and benchmark skill. *Weather and Forecasting*, v. 15, n. 1, p. 46-60, 1999.

22. SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. J. Wiley, New York, 2006.
23. SFETSOS, A.; SVLACHOGIANNIS, D. An analysis of ozone variation in the Greater Athens area using Granger Causality. Atmospheric Pollution Research. v. 4, n. 3, p. 290-297, 2013.
24. SIMS, C. "Macroeconomics and reality". Econometrica, v. 48, n. 1, p. 1-48, 1980.
25. WANG, W.; NIU, Z. VAR model of PM_{2.5}, weather and traffic in Los Angeles Long Beach. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRINT, 2009, China. Anais eletrônicos... Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org>>. Acesso em: 20 de maio 2014.