

POLÍTICA AMBIENTAL DE RESTRICCIÓN VEHICULAR E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA INTEGRAL DE TRANSPORTE MASIVO EN LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN LA ZONA CENTRO DE BUCARAMANGA, COLOMBIA. UN ANÁLISIS DE INTERVENCIÓN

*Eddy Johanna Fajardo Ortiz**
*Giampaolo Orlandoni Merlia***
*Rafael Eduardo Borges Peña****
*Deicy Villalba Rey*****

RESUMEN

La estimación de modelos de series de tiempo ARIMA con intervención para analizar el comportamiento de los contaminantes atmosféricos (CO, NO₂, PM₁₀, O₃, SO₂) en el sector centro de la ciudad de Bucaramanga es el principal objetivo de este artículo. Para

* Lic. En Matemáticas, MSc en Estadística, estudiante de Doctorado en Estadística – UCV. Ex - Docente de la Universidad Autónoma de Bucaramanga - Colombia y Docente invitada de la ULA – Mérida. Autora de numerosos trabajos presentados en Eventos Científicos y publicados en Memorias. E-mail: eddyjfajardo@gmail.com

** Economista (Universidad de Los Andes, Venezuela); M.Sc. en Economía (Iowa State University, EE.UU.). Doctor (HC) en Estadística (ULA, Venezuela). Profesor titular, adscrito al Instituto de Estadística Aplicada y Computación de la (Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, ULA). E-mail: orlandon@ula.ve

*** Licenciado en Ciencias Estadísticas (UCV). Magister Scientiae en Estadística Aplicada (Universidad de Los Andes -ULA-, Mérida). Profesor agregado; Jefe de Cátedra de Estadística Aplicada. Coordinador del Grupo de Investigación en Bioestadística (Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, ULA). E-mail: borgesr@ula.ve

**** Lic. en Matemáticas, Especialista en Educación Matemática, MSc. en Estadística. Estudiante del Doctorado en Estadística – UCV. Docente e Investigadora de la Universidad Industrial de Santander-Colombia. Ex-Docente invitada de la ULA- Mérida. Autora de varios artículos científicos y capítulos de libros. Ponente en numerosos eventos científicos. E.mail: villalbadecy@gmail.com

Recibido: 19/06/2013

Aprobado: 16/09/2013

ello se utilizó una serie de tiempo semanal que cubre el periodo Enero 2001- Diciembre 2010. Este periodo se dividió en dos sub-periodos: el sub-periodo de estimación del modelo (2001-2009) y el sub-periodo de predicción (2010). Se quiere tener un claro entendimiento de la evolución de cada una de estas variables a través de modelos que puedan explicar el comportamiento de las series de datos, mediante la metodología Box-Jenkins. El análisis de intervención muestra que han sido efectivas las políticas ambientales implementadas en la ciudad, siendo la restricción vehicular (pico y placa) la más importante desde el momento que inició, en el año 2006. El SITM, implementado a partir de 2010, ha contribuido a que los niveles de concentración de PM10, SO2, CO hayan disminuido.

Palabras clave: Serie de tiempo, metodología Box-Jenkins, análisis de intervención, contaminantes atmosféricos.

ENVIRONMENTAL POLICY FOR VEHICULAR RESTRICTION AND IMPLEMENTATION OF AN INTEGRAL SYSTEM FOR MASSIVE TRANSPORTATION ON THE CONCENTRATION OF AIR POLLUTANTS AT DOWNTOWN BUCARAMANGA, COLOMBIA. AN INTERVENTION ANALYSIS

ABSTRAC

The main objective of this paper is the identification and estimation of ARIMA time series intervention models to analyze the behavior of atmospheric pollutants (CO, NO2, PM10, O3, SO2) in downtown of Bucaramanga city, based on weekly time series data, spanning the period January 2001 - December 2010. This period was divided into two sub-periods: the model estimation period (2001-2009) and the prediction period (2010). Using the Box-Jenkins methodology, ARIMA models were identified that explain the evolution and behavior of each variable. The intervention analysis shows that the environmental policies implemented in the city have been effective, being the vehicle restrictions (pico y plata), the most important since it began in 2006. The BRT, implemented since 2010, has contributed to reduce the concentration levels of PM10, SO2, and CO.

Key words: *time series, Box-Jenkins methodology, intervention analysis, air pollutants.*

Introducción

En Colombia la contaminación atmosférica se ha constituido en uno de los principales problemas ambientales, cuya dinámica variable ha propiciado que se incrementen los efectos sobre la salud humana y el medio ambiente. Las cifras del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial muestran que el 41% de la contaminación del aire en el país se genera de manera concentrada en las ciudades de Bogotá, Medellín, Bucaramanga, Cali y Barranquilla.

En Bucaramanga el incremento progresivo año tras año del número de carros y motos, la distribución deficiente de rutas de buses y las vías angostas, causan gran congestión vehicular -especialmente en las llamadas “horas pico” y la zona céntrica de la ciudad- la cual genera, además de la dificultad en el desplazamiento de las personas, estrés y problemas de salud.

Las concentraciones de algunos contaminantes en la atmósfera por encima de los estándares fijados en las normas ambientales y los largos periodos de exposición, han generado preocupación en las autoridades y la necesidad de implementación de algunas políticas ambientales para la protección de la calidad del aire y la salud de la población.

Conocer cómo es el comportamiento de los contaminantes ambientales NO₂, SO₂, O₃, PM₁₀ y CO ayudará a los entes gubernamentales y de salud a evaluar los mecanismos que se han implementado (pico y placa, SITM) para disminuir los niveles de estos y saber que tan efectiva han sido estas políticas.

El análisis de serie de tiempo es una alternativa para conocer cómo es el comportamiento de estos contaminantes y poder evaluar si las políticas ambientales que se han implementado en la ciudad han funcionado para disminuir las concentraciones de los contaminantes atmosféricos. A continuación se muestran los objetivos que se propusieron en esta investigación:

- Identificar los modelos de series de tiempo univariantes al que se ajustan las concentraciones de O₃, PM₁₀, NO₂, SO₂ y CO que permitan predecir su comportamiento.
- Evaluar la efectividad de las diversas políticas ambientales implementadas en la ciudad de Bucaramanga para la disminución de la contaminación ambiental a través de los modelos de intervención.

Metodología estadística

La metodología que se lleva a cabo en este trabajo, se fundamenta en la construcción de un modelo de serie de tiempo mediante la metodología Box-Jenkins aplicando modelos de intervención para cada uno de los contaminantes atmosféricos en la zona centro de Bucaramanga.

Para este estudio se usó el siguiente software: SAS v9.2 y el R2.10.1 (librerías FORECAST, AST, FBASICS, MASS, TSA, TSERIES y URCA).

Selección de los datos

Los datos seleccionados provienen de la estación de monitoreo ubicada en el centro de la ciudad y fueron suministrados por la CDMB (Corporación para la Defensa de Bucaramanga). La serie de datos se tomó desde el 1 de enero de 2001 hasta el 31 de diciembre de 2010, conformándose una serie temporal de 520 observaciones semanales.

Análisis de datos

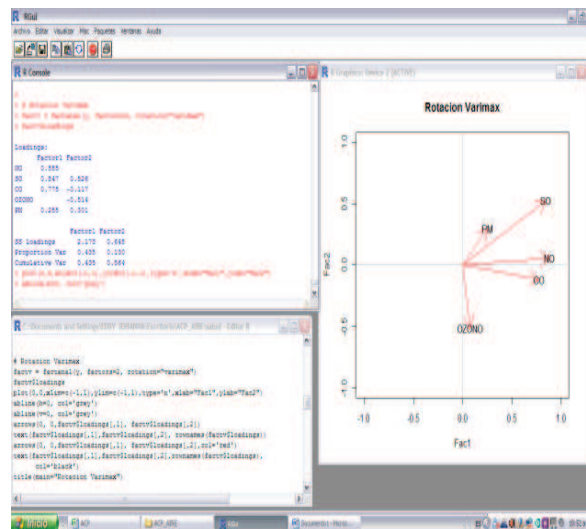
Antes de realizar el análisis de series de tiempo, se hizo un análisis de componentes principales, el cual mostró que existe una correlación positiva entre los contaminantes NO₂, CO y SO₂. Cabe resaltar que estos contaminantes afectan directamente las concentraciones de PM₁₀ y O₃.

La tabla 1 muestra los valores propios del ACP, allí se observa que los dos primeros componentes explican un 72.38% de la varianza total.

Tabla 1. ACP Contaminantes Atmosféricos

Ci	Inercia	Iner Acum	% Varianza
1	2.505	2.505	50.11
2	1.114	3.619	72.38
3	0.866	4.485	89.71
4	0.355	4.840	96.61
5	0.159	5.000	100.00

En función de las variables originales, los dos primeros componentes pueden interpretarse de la siguiente manera:



- *Factor lluvia ácida* (dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono)
- *Factor enfermedades respiratorias* (ozono y material particulado).

Análisis de series de tiempo

Proceso de estabilización de las series

Para estabilizar la varianza se usó la transformación Box Cox y para estabilizar la media se aplicó primera diferencia a cada contaminante. A continuación se muestra el parámetro λ que se aplicó a la serie de cada contaminante.

Tabla 2. Transformación

Contaminante	Transformación Box-Cox
CO	$\lambda = \frac{3}{5}$
NO2	$\lambda = \frac{4}{5}$
SO2	$\lambda = \frac{1}{2}$
PM10	$\lambda = \frac{3}{5}$
O3	$\lambda = \frac{1}{2}$

Los modelos identificados son de tipo ARIMA Estacional, cuya expresión es la siguiente:

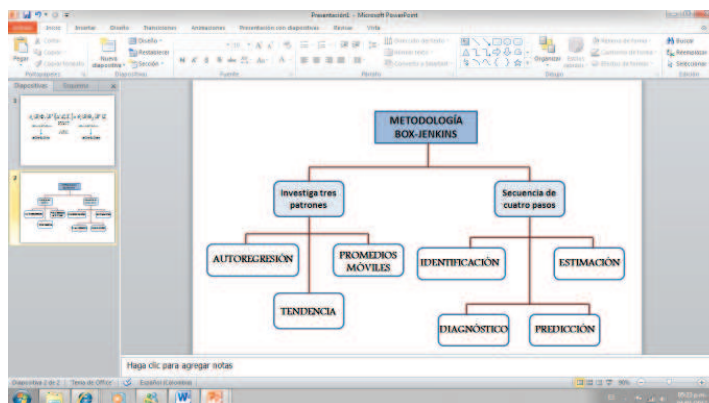
$$\phi_p(B)\Phi_p(B^S)[\Delta^d \Delta^D X_t] = \theta_q(B)\Theta_q(B^S)Z_t$$

REGULAR ESTACIONAL → MODELO AR

*D REGULAR *D ESTACIONAL → DIFERENCIACION DE LA SERIE

REGULAR ESTACIONAL → MODELO MA

El esquema de la metodología Box-Jenkins que se utilizó en el proceso identificación-estimación-diagnóstico es:



A continuación se muestran los resultados:

Resultados y discusión

Los resultados están divididos en dos partes. La primera parte muestra los modelos de serie de tiempo estimados para cada contaminante; la segunda parte reporta el análisis de modelos de intervención, también para cada contaminante (NO₂, SO₂, CO, PM₁₀, O₃).

La tabla 3 resume los modelos ARIMA estimados:

Tabla 3. Modelos ARIMA

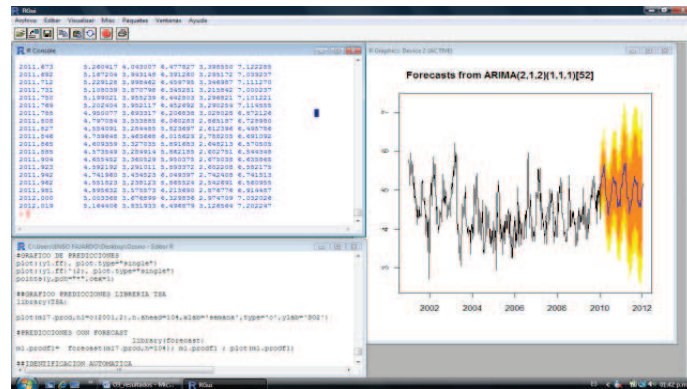
Cont. Atm	Modelo	AICc
O ₃	ARIMA(2,1,2)(1,1,1) ₃₂	427.56
PM ₁₀	ARIMA(0,1,2)(0,1,1) ₃₂	-3005.93
NO ₂	ARIMA(0,1,1)(1,1,0) ₃₂	1564.78
SO ₂	ARIMA(1,1,2)(2,1,1) ₃₂	155.11
CO	ARIMA(1,1,1)(0,1,1) ₃₂	-621.9

1. Ozono (O3)

El gráfico de predicción del ozono, muestra que su comportamiento es cíclico, con un comportamiento similar año tras año: la concentración de O3 aumenta en el primer y tercer trimestre del año, y disminuye en el segundo y cuarto trimestre. Este comportamiento se debe a que en las temporadas de lluvia el O3 disminuye y en la temporada de verano el O3 aumenta.

La gráfica también muestra que la concentración de O3 no tiende a disminuir con el tiempo.

Predicción O3



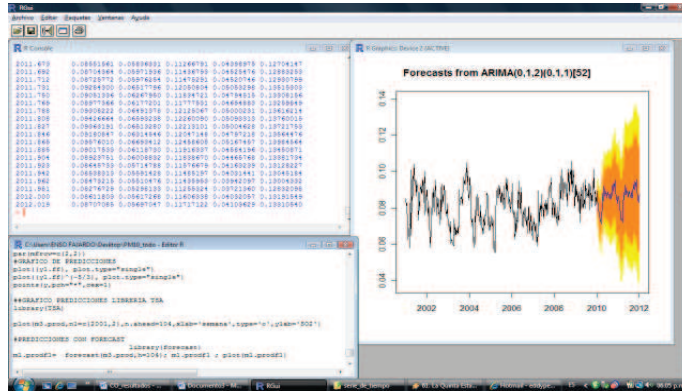
2. Material Particulado (PM10)

La implementación de las políticas ambientales parece haber ayudado a mejorar la concentración de PM10 en el centro de la ciudad, a principios del año 2010 empieza a funcionar el metro línea y se observa una disminución de PM10.

El PM10, al igual que el O3, también tiene un comportamiento que se repite año tras año. En los trimestres de lluvia disminuye y en el verano aumenta su concentración.

Este comportamiento es contrario al del contaminante O3, es decir, que cuando el PM10 aumenta, el O3 disminuye.

Predicción PM10

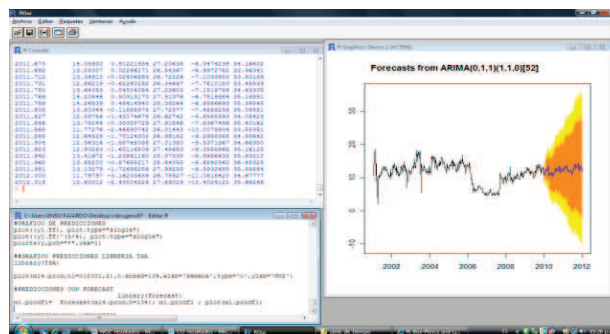


3. Dióxido de Nitrógeno (NO2)

El gráfico del pronóstico de la serie de tiempo de NO2 muestra que la concentración de este contaminante tiende a mantener constante su comportamiento desde el año 2008.

El nivel de contaminación del aire con NO2 ha sido moderado y parece mantenerse así según la predicción hasta el 2012, lo que significa que la concentración de NO2 en el centro de Bucaramanga no es el principal causante de daño en la salud humana. Por lo tanto se puede decir que la implementación del SITM en esta parte de la ciudad ha tenido efectos positivos (al menos para la concentración de NO2).

Predicción NO2

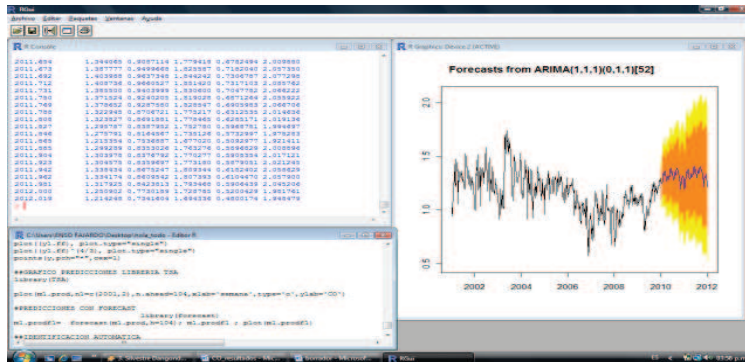


4. Monóxido de carbono (CO)

El gráfico del pronóstico de la concentración de CO muestra que este contaminante tiende a incrementar su concentración en el tiempo, aunque no de la misma manera que en los primeros años. Es preocupante que los niveles de contaminación no disminuyan a partir del año 2010, año en que comienza a funcionar el SITM (ese año se caracterizó por el fuerte invierno, y se sabe que las concentraciones de CO tienden a aumentar durante esas épocas).

Debe recordarse que el monóxido de carbono es un contaminante muy nocivo para la salud, pues es uno de los principales causantes de enfermedades respiratorias, al no permitir que llegue suficiente oxígeno al cerebro y corazón.

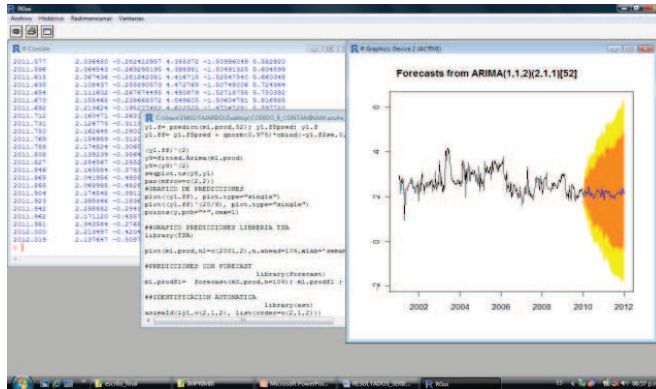
Predicción CO



5. Dióxido de Azufre (SO2)

La observación del gráfico de predicción del SO2 indica que dicho contaminante tiende a disminuir muy lentamente en el tiempo. Esta disminución ha venido sucediendo desde inicios del año 2010, que es cuando comienza a funcionar el SITM en la ciudad.

Predicción SO2



Análisis de Intervención

Los modelos de intervención fueron desarrollados por Box y Tiao (1975); ellos permiten determinar el efecto de ciertas intervenciones conocidas en el comportamiento de una serie de tiempo específica.

Intervenciones para control de contaminación en Bucaramanga

En el transcurso de los últimos diez años se han implementado políticas ambientales para mejorar la calidad del aire. En este estudio se estudian algunas de ellas para evaluar, a través de los modelos de intervención, si realmente han sido efectivas en la disminución de la contaminación atmosférica. En la tabla 4 se muestran las intervenciones que se han hecho en la ciudad de Bucaramanga.

Tabla 4. Intervenciones



A continuación, en la tabla 5 se muestran los resultados del análisis de intervención aplicado a cada uno de los contaminantes:

Tabla 5. Modelos de intervención

Cont.	Modelo	AICc	AICc Después Intervención
Atm			
O3	ARIMA(2,1,2)(1,1,1) ₅₂	427.56	No disminuyó
PM10	ARIMA(0,1,2)(0,1,1) ₅₂	-3005.93	-3006.33
NO2	ARIMA(0,1,1)(1,1,0) ₅₂	1564.78	1563.24
SO2	ARIMA(1,1,2)(2,1,1) ₅₂	155.11	153.96
CO	ARIMA(1,1,1)(0,1,1) ₅₂	-621.9	-624.22

La tabla muestra que el Akaike corregido AICc disminuyó en cuatro de los contaminantes estudiados, (NO2, CO, PM10, SO2), lo que es indicativo de la efectividad de las políticas ambientales aplicadas en la zona centro de Bucaramanga. Sin embargo, la concentración de Ozono no ha disminuido, observándose un incremento paulatino de su concentración.

Conclusiones

Los resultados para cada una de las series indican:

- **Monóxido de Carbono:** Serie con tendencias descendentes (hasta el año 2007) y ascendente (a partir del año 2008), el modelo identificado que mejor explica la serie es **ARIMA(1,1,1)(0,1,1)**.
- **Dióxido de Nitrógeno:** Muestra dos tendencias (ascendente 2001 - 2005 y 2007 – 2008, descendente 2006 y 2010), el modelo que mejor explica la serie es **ARIMA(0,1,1)(1,1,0)**
- **Material Particulado PM10:** Se observa una tendencia que se repite cada dos años (en el primer año tiende a aumentar y en el segundo año tiende a disminuir), la serie es explicada por el modelo **ARIMA(0,1,2)(0,1,1)**

- **Ozono troposférico:** Presenta dos tendencias (descendente 2001 - 2006 y 2007 – 2008, ascendente 2006 y 2009), el modelo identificado es el **ARIMA(2,1,2)(1,1,1)**.
- **Dióxido de azufre:** Serie con tendencias ascendentes (2001 - 2006 y 2007 – 2008) y descendentes (2006 y 2009), el modelo encontrado que mejor explica la serie es **ARIMA(1,1,1)(0,1,1)**.

Analizando los resultados, puede concluirse que la predicción generada por cada uno de los modelos estimados es aceptable y razonable.

El análisis de intervención muestra que han sido efectivas las políticas ambientales implementadas en la ciudad, siendo la restricción vehicular (Pico y placa) la más efectiva desde el momento que inició (año 2006). El SITM implementado a partir de 2010 ha contribuido a que los niveles de concentración de PM10, SO2, CO hayan disminuido.

Teniendo en cuenta los resultados encontrados, se recomienda continuar con la implementación de políticas ambientales, además de institucionalizar programas de concientización dirigidos a la población, para que todos contribuyan a mejorar la calidad del aire de la ciudad.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Santo Tomás de Aquino, al grupo de Investigación de Química Ambiental USTA, a la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), por suministrar la base de datos del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire de Bucaramanga.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amado, Gómez (2004). Estudio Comparativo de contaminación atmosférica por la operación de un S.I.T.M. en Bucaramanga. Tesis de grado. Escuela de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia.

Política... Eddy Johanna Fajardo Ortiz, Giampaolo Orlandoni Merlia, Rafael Eduardo Borges Peña, Deicy Villalba Rev. **AGORA-Trujillo**. Venezuela. Año 16 N° 32. JULIO-DICIEMBRE-2013. pp. 17-32

Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica y el Caribe ARPEL. [Sitio en Internet]. Disponible en <http://www.arpel.org/>

Box, Jenkins, Reinsel (1994) Time Series Analysis. Forecasting and Control. Third Edition. Prentice-Hall Internacional.

Bravo, Nava, Muhlia (2001). Linear and regressive stochastic models for prediction of daily maximum ozone values at Mexico City atmosphere. *Atmósfera*. Vol.14 .pp. 113-123.

Camacho, Flamand (2008). Políticas intergubernamentales para controlar la contaminación del aire en ciudades mexicanas. Una evaluación. *Gestión y Política Pública*, Vol. XVII, Núm. 2, sin mes, 2008, pp. 261-313. Centro de Investigación y Docencia Económicas, A.C. D.F., México. Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=13311158001>.

Campos I. *Saneamiento Ambiental*. San José: Universidad Estatal a distancia San José, Costa Rica; 2003.

CDMB (Corporación de Defensa de la Meseta de Bucaramanga). *Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Area Metropolitana de Bucaramanga*. Informe 2009.

Colombialink. *Datos generales de Bucaramanga* [Sitio Internet]. Disponible en http://www.colombialink.com/01_INDEX/index_turismo/destinos/bucaramanga.html_Consultado: marzo 12 de 2011.

Corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga CDMB. *Datos de Monitoreo*. [Sitio en Internet]. Disponible en <http://www.cdm.gov.co/web/index.php/monitoreo-ambiental-infomenu3-456/red-de-monitoreo-del-aire-infomenu3-459/338-datos-de-monitoreo.html>

Curso de orientación para el control de la contaminación del aire. [sitio en Internet]. Disponible en http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/orienta2/frame_o.html. Consultado: marzo 10 de 2011.

Davis (2008). The Effect of Driving Restrictions on Air Quality in Mexico City. *Journal of Political Economy*. Vol. 116. No. 1. Pp. 38-81. Universidad de Michigan.

Díaz (2002). *Estadística Multivariada: Inferencia y métodos*. Mc Graw Hill, Bogotá.

García (2001). Predicción del máximo de Ozono utilizando metodología ARIMA sobre los datos monitorizados de calidad del aire de Valladolid. Documento Técnico. Servicio de Medio Ambiente. Ayuntamiento de Valladolid.

Gorritty (2006). Pronóstico de concentraciones máximas diarias de ozono: caso estación SEMAPA, Red MoniCA. *ACTA NOVA*; Vol. 3, N° 2, junio 2006. Pp. 354-371.

Grazuleviene R., Maroziene L., Dulskiene V. Maluskiene V., Azaraviviene A., Laurinaviciene D., Jankauskiene K. (2004). Exposure to urban nitrogen dioxide pollution and risk of myocardial infarction. *Scand J. Work Environ Health*. 30(4): 293-298.

Hernández (2009). Modelado atmosférico para determinar niveles máximos diarios de ozono en la ciudad de Guadalajara. Tesis de Maestría. Departamento de Matemáticas. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa. Distrito Federal. México.

Jaramillo, González, Nuñez, Portilla, Lucio (2005). Análisis de Series de Tiempo univariante aplicando metodología de Box-Jenkins para la predicción de ozono en la ciudad de Cali. *Revista Facultad de Ingeniería de Universidad de Antioquia*. Número 039. pp 79-88. Universidad de Antioquia. Medellin. Colombia.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2007). *Informe Anual sobre el Estado del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables en Colombia: Calidad del Aire*. Colombia; 2007.

Política... Eddy Johanna Fajardo Ortiz, Giampaolo Orlandoni Merlia, Rafael Eduardo Borges Peña, Deicy Villalba Rev. **AGORA-Trujillo**. Venezuela. Año 16 N° 32. JULIO-DICIEMBRE-2013. pp. 17-32

Lacasaña, Aguilar, Romieu (2000). Evolución de la contaminación del aire e impacto de los programas de control en tres megaciudades de América Latina. *Revista Salud Pública de México* / vol.41, no.3. pp. 203-215.

Levy J. Carrothers T. Tuomisto J. Hammitt J. Evans J. (2001). *Assessing the public health benefits of reduced ozone concentrations*. *Environ Health Perspectives*; 109 (12): 9 – 20.

Lütkepohl (2005) *New Introduction to Multiple Time Series Analysis*. Editorial Springer-Verlag. Alemania.

Lütkepohl (2004) *Applied Time Series Econometrics*. Cambridge University Press. Inglaterra.

Martínez E., Díaz Y. (2004) *Contaminación Atmosférica*. Castilla: Universidad de Castilla.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). *Atlas Climatológico de Colombia*. Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.

Organización mundial de la Salud (2006) *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Ginebra: Ediciones de la OMS; 2006.

Organización Panamericana de la Salud (2000). *Los efectos sobre la salud*. [sitio de Internet]. <http://www.ucbcba.edu.bo/carreras/ingma/actividades/peaton2/peatonsalud.htm>. Consultado: noviembre de 2010

Peña (2002). *Análisis de Datos Multivariantes*. Mc Graw Hill, Madrid.