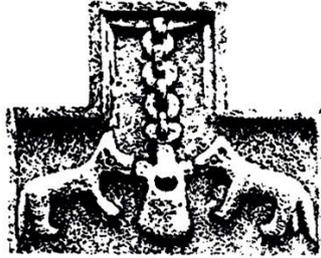


UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA
Estudios con Reconocimiento de Validez Oficial por Decreto
Presidencial del 3 de Abril de 1981



LA VERDAD NOS HARA LIBRES

*“PRONÓSTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA
METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO A TRAVÉS DEL
ANÁLISIS DE LAS SERIES DE TIEMPO DE LOS COMPONENTES DEL
IMECA”*

T E S I S

Que para obtener el grado de

MAESTRA EN INGENIERÍA DE CALIDAD

Presenta

CECILIA MONTERO LÓPEZ

Director: **MTRO. HUGO SERRATO GONZÁLEZ**
Lectores: **MTRO. ALFONSO MORALES IBARRA**
DR. PRIMITIVO REYES AGUILAR

Índice

Introducción.....	1
Antecedentes.....	1
Descripción del contenido capitular	6
Justificación.....	7
Trascendencia.....	7
Alcance.....	8
Objetivo.....	8
Objetivos específicos.....	8
Planteamiento del problema.....	8
Preguntas de investigación.....	11
Metodología a seguir.....	11
Capítulo 1.....	14
Panorama de la contaminación del aire.....	14
Introducción.....	14
1.1 La calidad del aire en el área metropolitana.....	14
1.2 Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México: SIMAT.....	18
1.2.1 Antecedentes.....	18
1.2.2 Componentes del Sistema de Monitoreo Atmosférico.....	23
1.2.3 Tendencias hacia el futuro del SIMAT.....	24
Resumen y conclusiones.....	25
Capítulo 2.....	27
El Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) como indicador de la calidad del aire.....	27
Introducción.....	27
2.1 Medición de la contaminación del aire.....	27
2.2 Índice Metropolitano de la Calidad del Aire: IMECA.....	28
2.3 Cálculo actual del IMECA.....	29
2.4 Forma en que se miden y reportan los contaminantes criterio en la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal GDF.....	31
Resumen y conclusiones.....	32
Capítulo 3.....	34
Descripción y comportamiento histórico de los componentes del IMECA.....	34
Introducción.....	34
3.1 Ozono.....	34

3.1.1 Evolución en la atmósfera	35
3.1.2 Evolución del ozono	35
3.1.3 Efectos en la salud	36
3.1.4 Límites permitidos	37
3.2 Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	38
3.2.1 Evolución.....	39
3.2.2 Efectos en la salud	40
3.2.3 Límites permitidos.....	41
3.3 Monóxido de carbono (CO).....	41
3.3.1 Evolución.....	42
3.3.2 Efectos en la salud	43
3.3.3 Límites permitidos.....	44
3.4 Dióxido de azufre (SO ₂)	44
3.4.1 Evolución.....	45
3.4.2 Efectos en la salud	46
3.4.3 Límites permitidos.....	47
3.5 Partículas	47
3.5.1 Origen	47
3.5.2 Clasificación	48
3.5.3 Evolución.....	49
3.5.4 Efectos en la salud	50
3.5.5 Límites permitidos.....	51
Resumen y conclusiones.....	52
Capítulo 4	53
Contramiedas del GDF para la reducción de emisiones contaminantes al ambiente. 53	
Introducción.....	53
4.1 Refinería de PEMEX en Azcapotzalco	53
4.2 Central Termoeléctrica del Valle de México.....	55
4.3 Programa “Hoy no circula”	56
4.3.1 Antecedentes del programa	56
4.3.2 Situación actual	59
Resumen y conclusiones.....	60
Capítulo 5 Series de tiempo.....	62
Introducción.....	62
5.1 Técnicas descriptivas en series de tiempo	63
5.1.1 Tipos de Variación.....	64

5.1.2 Series de Tiempo Estacionarias.....	66
5.1.3 Gráfica de una Serie de Tiempo.....	66
5.2 Función de auto-correlación y función de auto-correlación parcial: FAC y FACP.....	67
5.2.1 Función de auto-correlación (FAC).....	68
5.2.2 Función de auto-correlación parcial (FACP).....	71
5.3 Modelos de series de tiempo.....	71
5.3.1 Modelos MA.....	71
5.3.2 Modelos AR.....	74
5.3.3 Modelos mixtos.....	76
5.3.4 Modelos integrados.....	76
5.4 Medición del error en los pronósticos.....	81
5.4.1 Desviación media absoluta (MAD).....	82
5.4.2 Error cuadrático medio (MSD).....	82
5.4.3 Error porcentual absoluto medio (MAPE).....	83
5.4.4 Error porcentual medio (MPE).....	83
5.5 PRONÓSTICOS.....	85
5.5.1 Métodos para establecer pronósticos a largo plazo.....	85
5.5.2 Pronósticos a corto Plazo.....	88
Resumen y conclusiones.....	99
Capítulo 6.....	100
Análisis de series de tiempo de los componentes del IMECA.....	100
Introducción.....	100
6.1 Tendencia a largo plazo de cada componente del IMECA.....	100
6.2 Modelos ARIMA para componentes fuera de control.....	106
6.2.1 Modelo ARIMA para el NO ₂	107
6.2.2 Modelo ARIMA para el componente PM10.....	116
6.2.3 Modelo ARIMA para el componente PM2.5.....	126
6.3 Análisis de regresión.....	136
6.3.1 Análisis de regresión del IMECA.....	137
Resumen y conclusiones.....	143
Conclusiones generales y recomendaciones.....	147
BIBLIOGRAFÍA.....	151

Introducción

Antecedentes

Monitoreo de la calidad del aire

Uno de los más graves problemas que tenemos los habitantes del planeta Tierra es la contaminación del aire que respiramos, primordial para la vida.

La contaminación del aire comienza cuando el hombre aparece en la Tierra y empieza a utilizar el fuego. En una primera época, el hombre vive en armonía con su entorno, adquiere conocimientos naturales, estudia las estrellas, las plantas, los ciclos climáticos, pero hace aproximadamente diez mil años, el hombre se vuelve sedentario e inicia la manipulación de las plantas verdes y aparece el fuego como el elemento físico que emplea el ser humano para convertir el bióxido de carbono en oxígeno, sin embargo, por fortuna, ese fuego inicial fue mínimo.

Cuando un gran número de personas comenzaron a vivir juntas y a utilizar carbón en lugar de leña, percibieron como el humo y los gases (que ahora sabemos son sulfurosos) enviaban gran parte del aire que los rodeaba.

A continuación en la Figura A se muestra un ejemplo del fenómeno de la contaminación del aire en las ciudades. ¹

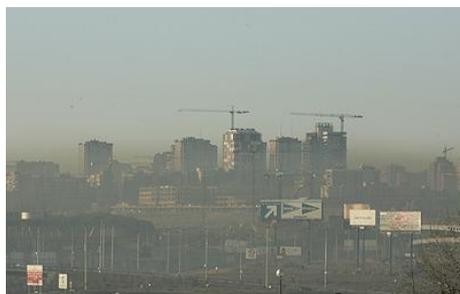


Figura A

<http://gonzo-proyecto.blogspot.com/2007/08/contaminacion-del-aire.html> octubre 2010

¹http://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=RBuVVI0yTq4C&oi=fnd&pg=PA44&dq=antecedentes+de+la+calidad+del+aire+en+el+mundo&ots=GxtoLdrBK5&sig=kcmCdI4D6RObUiug765j_ZYdl0#v=onepage&q=antecedentes%20de%20la%20calidad%20del%20aire%20en%20el%20mundo&f=false consultada el 8 de octubre 2010

La tabla siguiente muestra la evolución de los problemas y algunos ejemplos relacionados con la contaminación del aire en el mundo²:

Año	Ciudad	Acontecimientos
1648	Londres	Se prohíbe el uso de la hulla en la ciudad.
1800	Inglaterra	La hulla regresa como combustible, comienza el modernismo industrial. Se generan gases como Cloro, Amoníaco, Monóxido de Carbono y Metano que provocan enfermedades como bronquitis y neumonía.
1881	Chicago	Se aprueba la primera Ley Norteamericana contra el humo.
1939	Bélgica	El humo generado por las fábricas combinado con niebla, afectó a miles de personas y causó la muerte de 70 de ellas en 3 días.
1948	Nueva York	Emisiones de fundición de zinc y una fábrica de alambre, acero y ácido sulfuroso, causaron enfermedades respiratorias y muerte de 20 personas.
1952	Londres	Durante 5 días la ciudad quedó envuelta en una nube de humo. Al término de 9 días hubo 2851 muertes más de las previstas.
1956	Londres	Niebla envolvió a la ciudad durante 18 horas y causó 1000 muertes más de las previstas.
1942, 1954 y 1955	Los Ángeles	Aumento del índice de mortalidad de personas de más de 65 años. Se apoyó públicamente el concepto de smog fotoquímico.
1971	Nueva York	Durante un episodio de inversión térmica, la concentración de oxidantes fotoquímicos subió a un nivel excesivo que ocasionó serias enfermedades respiratorias.
1976	Italia	Explosión de una planta petroquímica originó nube de bióxido de arsénico ocasionando hospitalización de 40 personas.

² <http://www.tuobra.unam.mx/publicadas/030115172514.html> consultada el 8 de octubre 2010

En México la evolución de la contaminación del aire fue la siguiente³:

Años	Acontecimientos
1980's	Por los altos índices de contaminación el Gobierno del Distrito Federal establece el Programa Coordinado para mejorar la calidad del aire en el Valle de México
1984	La Secretaría Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) lanza el "Programa Nacional de Ecología, con la meta de abatir la contaminación atmosférica.
1985	Petróleos Mexicanos (PEMEX) sustituye de manera gradual la gasolina con plomo para reducir este contaminante sin embargo se incrementan los hidrocarburos y el ozono.
1986	El gobierno del D.F. decreta el Programa denominado "Las Medidas Contra la Contaminación en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México", para la mejoría en los combustibles y la limitación a la entrada al DF de los autobuses del Estado de México, la ampliación de la línea 6 del metro.
1987	Se presentó la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, donde se señala el marco normativo del Programa de Verificación Vehicular de Emisiones.
1989	Inicia obligatoriamente El Programa "Hoy No Circula" decretado por el Gobierno del Distrito Federal.
1989	Se cambió el nombre del índice de la calidad del aire del IMEXCA (Índice Mexicano de la Calidad del Aire) a IMECA (Índice Metropolitano de la Calidad del Aire). Entró en funcionamiento la Red Automática del Monitoreo Atmosférico (RAMA) con 25 estaciones para el reporte continuo 24 horas, los 365 días del año.
1990	La recién formada Subsecretaría de Ecología instaló redes manuales de monitoreo atmosférico en la Ciudad de México y en nueve ciudades del interior de la República.
1991	Se comienzan a sustituir las "combis" por microbuses con convertidor catalítico.
1992	Comienzan a salir vehículos nuevos con emisiones similares a las de los vehículos de Estados Unidos.
1991-1994	Se exigió la instalación en fábricas de medidores continuos de partículas, bióxido de azufre, etc, en chimeneas.
1996	Se crea la Comisión Ambiental Metropolitana.
2000-2010	Proyecto para el Diseño de una Estrategia Integral de Gestión de la Calidad del Aire en el Valle de México 2001-2010, Massachusetts Institute of Technology, con el apoyo de las autoridades del D.F., del Estado de México y del Gobierno Federal.

Como se puede observar, la contaminación del aire ha ido cobrando cada vez más importancia para los países y ciudades, en particular para la ciudad de México donde se han establecido diversas iniciativas.

³ <http://www.tuobra.unam.mx/publicadas/030115172514.html> consultada el 11 de octubre 2010
<http://www.mty.itesm.mx/die/ddre/transferecia/Transferecia55/eli2-55.htm> consultada 13 octubre 2010

Para el estudio del comportamiento histórico de los contaminantes al aire, así como para pronosticar sus niveles a un futuro cercano, se pueden utilizar los modelos matemáticos de series de tiempo que se presentan a continuación.

Modelos de series de tiempo

Los modelos de series de tiempo se construyen sobre la premisa que algunas variables tienen un comportamiento histórico recurrente, particular que puede ser modelada y explotada para fines de pronóstico, como puede verse en la Figura B:

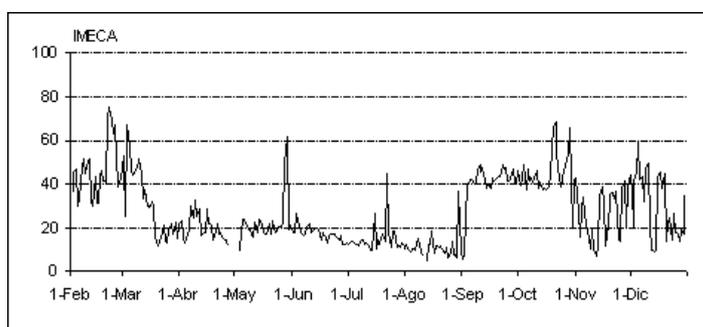


Figura B

IMECA máximo diario en Aguascalientes durante febrero-diciembre, 1997
www2.ine.gob.mx/.../libros/113/cap11.html consultada el 18 de octubre 2010

Estos modelos trabajan capturando los patrones en los datos históricos de manera que se pueden extrapolar al futuro cercano. Son adecuados cuando se puede asumir una cantidad razonable de datos y una continuidad en el futuro próximo de las condiciones que se presentaron en el pasado. Inclusive se adaptan mejor al corto plazo del pronóstico. Esto se debe a la hipótesis de que los patrones pasados y las tendencias actuales se asemejan a los patrones y tendencias que se van a presentar en el futuro. Esto es una suposición razonable en el corto plazo, pero va perdiendo validez en el largo plazo.⁴

Existen una serie de patrones que se pueden presentar al analizar el comportamiento histórico de los componentes de la contaminación del aire, que pueden ser

⁴<http://www.articuloz.com/planificacion-estrategica-articulos/modelos-de-series-de-tiempo-para-pronosticos-de-demanda-2759516.html> consultada el 18 de octubre 2010

principalmente: tendencias, ciclos, estacionalidad y otros. En la figura C se muestran los patrones antes mencionados:



Figura C
forma típica de patrones de series de tiempo
admin.udla.mx/mrs/index.php?option=com_conten...

consultado el 18 de octubre 2010

Para el modelaje de estos patrones, existen diversas series de tiempo desde las más simples, como promedios móviles, modelos de suavización exponencial, hasta modelos más complejos como son los de Box-Jenkins (modelos ARIMA) con los cuales este estudio se centrará.

Modelos causales

Los modelos de series de tiempo sólo analizan el comportamiento de un componente a un tiempo, sin importar como se desempeñan otras variables: humedad, temperatura, viento, etc. Para analizar en forma simultánea la influencia de diversos factores y componentes en la calidad del aire, se utilizan modelos de regresión múltiple que permiten identificar las variables que tienen influencia significativa en la contaminación del aire, y por ello, se planteará un modelo de este tipo solo como referencia ya que no es objeto de estudio de esta tesis.



http://jesusvaldez.blogspot.com/2008_06_01_archive.html octubre 2010

Descripción del contenido capitular

En el capítulo 1 se hablará sobre algunos organismos preocupados por los altos niveles de contaminación del aire, medidas que se han implementado, así como del SIMAT (Sistema de Monitoreo Atmosférico).

El capítulo 2 planteará cómo se realiza la medición de la contaminación del aire en la Ciudad de México, esto es a través del Índice Metropolitano de la calidad del aire (IMECA).

En el capítulo 3 se describirán las principales características de cada uno de los componentes del IMECA.

El capítulo 4 señalará algunas contramedidas por parte del Gobierno del Distrito Federal (GDF) para la reducción de emisiones contaminantes al ambiente.

En el capítulo 5 se definirá el concepto de serie de tiempo, se hablará de las alternativas para hacer análisis descriptivo de las series de tiempo, de los modelos estadísticos asociados con estas y de procedimientos tanto para ajustar modelos a series observadas como para hacer pronósticos a futuro.

También se presentará una breve descripción de las técnicas de suavizamiento y modelos Box y Jenkins para series de tiempo.

En el capítulo 6 se analizará la tendencia a largo plazo para cada uno de los componentes asociados al IMECA, ajustando un modelo ARIMA para aquellos componentes cuya tendencia a largo plazo esté fuera de las normas establecidas para hacer pronósticos a corto plazo. Y finalmente se hará un análisis de regresión para estudiar la relación de cuatro variables meteorológicas frente al IMECA.

Justificación

De acuerdo con los estudios que se han realizado en materia de salud en el Área Metropolitana de la ciudad de México, la cual es considerada actualmente como la urbe con más problemas de contaminación en la República Mexicana y quizás en el mundo, se estima que poco más de 9.5 millones de habitantes, del total de su población, estamos expuestos día con día, a altas concentraciones de diversos contaminantes.

Si las concentraciones promedio actuales de contaminación en el aire se controlaran hasta cumplir con la Norma de protección a la salud, se lograría evitar al año alrededor de 20,500 casos de admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias y cerca de 132,500 visitas a la sala de emergencias por padecimientos respiratorios.⁵

Conforme a los antecedentes de la evolución de los contaminantes existentes en el aire, se deriva la importancia del presente estudio.

Este trabajo se enfocará al modelaje de los componentes que integran el IMECA (nivel de contaminación del aire), con objeto de predecir el comportamiento de los componentes críticos a un futuro cercano, que permita recomendar acciones preventivas para evitar daños a la salud.

Trascendencia

Establecer modelos para el análisis de los contaminantes asociados al Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), que pueden servir como referencia, ya sea para tomar acciones preventivas en el corto plazo (renovación del parque vehicular, revisión de los límites permitidos en la verificación vehicular, reformulación de la gasolina, doble hoy no circula, reducción de actividades al aire libre, etc.) así como para implementar medidas efectivas a largo plazo que tengan como efecto un medio ambiente más saludable en el Área Metropolitana de la Ciudad de México.

⁵ http://www.sma.df.gob.mx/transparencia/I/plan_verde_vlarga.pdf consultada el 19 de octubre 2010

Alcance

Este estudio se realiza con base en la información generada por el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de los niveles de los componentes del indicador IMECA para el Área Metropolitana de la Ciudad de México.

Objetivo

Establecer modelos de series de tiempo para el análisis y pronóstico del comportamiento de los componentes del IMECA en el Área Metropolitana de la Ciudad de México.

Objetivos específicos

1. Conocer la evolución histórica de las mediciones y contramedidas relacionadas con los contaminantes del aire en la Ciudad de México y en las ciudades del mundo.
2. Recolección de datos históricos de los niveles de cada uno de los componentes del IMECA.
3. Estudio de los diferentes modelos de series de tiempo disponibles en la literatura.
4. Aplicación de los modelos de series de tiempo para el análisis del comportamiento de los componentes del IMECA.
5. Proponer los modelos más adecuados para el análisis de los contaminantes principales del IMECA.
6. Plantear el análisis causal de factores que influyen en el IMECA como modelo alternativo.

Planteamiento del problema

El IMECA es un indicador de la calidad del aire en la zona metropolitana de la ciudad de México, está integrado por los siguientes contaminantes: ozono (**O₃**), partículas menores a 10 micrómetros (**PM10**), partículas menores a 2.5 micrómetros (**PM2.5**), dióxido de azufre (**SO₂**), dióxido de nitrógeno (**NO₂**), monóxido de carbono (**CO**).

El propósito de este estudio es el de analizar su desempeño a través de modelos de series de tiempo para poder hacer pronósticos a corto plazo de los mismos. Para lo cual se presenta a continuación la situación actual de cada uno de los contaminantes antes mencionados y sus límites permitidos:

Ozono (O₃)
<p>LÍMITES PERMITIDOS: En México la Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993 establece un límite máximo permisible para ozono de 0.11 ppm, o lo que es equivalente a 216 µg/m³, en una hora, para no rebasarse ninguna vez al año, para protección a la salud de la población susceptible.</p>
<p>SITUACIÓN ACTUAL: El ozono muestra un decremento en sus concentraciones máximas con respecto a los lineamientos y normas vigentes. En los últimos dos años se ha incrementado el número de días por debajo del límite máximo permitido. Sin embargo, todavía existe una situación de riesgo por exposición, sobre todo en la región suroeste.</p> <p>Este contaminante se encuentra dentro de los límites establecidos.</p>

Dióxido de Nitrógeno (NO₂)
<p>LÍMITES PERMITIDOS: En México la norma oficial mexicana NOM-023-SSA1-1993 establece un límite máximo permisible de 0.210 ppm promedio horario, la cual no debe excederse más de una hora al año. La Organización Mundial de la Salud recomienda un valor de 40 µg/m³ (0.021 ppm) para el promedio anual y de 200 µg/m³ (0.106 ppm) para el promedio de una hora.</p>
<p>SITUACIÓN ACTUAL El monitoreo atmosférico de la calidad del aire ha demostrado un tendencia decreciente en la concentración de este contaminante, sin embargo, esta tendencia no es regular, debido a que su formación es principalmente de tipo secundario, su disminución está en función del control de sus fuentes de emisión.</p> <p>Este contaminante se encuentra fuera de los límites establecidos en normas, por lo que se requiere controlarlo.</p>

Monóxido de Carbono (CO)
<p>LÍMITES PERMITIDOS: En México la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993 establece un límite máximo permisible de 11.0 partes por millón (ppm) en un promedio móvil de 8 horas, lo cual no debe excederse más de una vez al año.</p>
<p>SITUACIÓN ACTUAL De acuerdo con los datos del monitoreo atmosférico, desde 1991 la concentración de monóxido de carbono en el aire ambiente ha presentado una tendencia a la baja. La renovación del parque vehicular, la instalación de sistemas de inyección electrónica y la incorporación de los convertidores catalíticos en los vehículos que circulan en la Ciudad de México son las medidas</p>

qua han impactado de manera significativa en la disminución de este contaminante.

Este contaminante se encuentra dentro de las normas establecidas.

Dióxido de Azufre (SO₂)

LÍMITES PERMITIDOS:

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda como límite una concentración de 100 a 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas y de 40 a 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en una media aritmética anual. La Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-1993 establece como límite, una concentración de 0.13 ppm (ó 341 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) promedio de 24 horas, una vez al año y 0.03 ppm (ó 79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en una media aritmética anual para proteger a la población susceptible.

SITUACIÓN ACTUAL

De acuerdo con los datos del monitoreo atmosférico, desde 1992 la concentración de dióxido de azufre en el aire ambiente ha presentado una tendencia a la baja. La medida que ha provocado un mayor impacto en la concentración de este contaminante es la reducción gradual del contenido de azufre en los combustibles empleados en el Valle de México, tanto para la industria como para los vehículos.

Este contaminante se encuentra dentro de límites establecidos en la norma.

PARTÍCULAS

LÍMITES PERMITIDOS:

La Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993 de (a)PST, (b)PM₁₀ y (c)PM_{2.5} establece como límites de protección a la salud:

(a)Una concentración de 210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas.

(b)Una concentración de 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media aritmética anual. Dado los efectos de este tipo de partículas en la salud, son motivo de amplias discusiones para reformular las normas, debido a que en concentraciones bajas (30 a 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) hay un incremento en la demanda de atención médica por padecimientos crónicos respiratorios y aumento de muertes prematuras.

(c)Una concentración de 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas y 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media aritmética anual.

SITUACIÓN ACTUAL

Aún se presentan concentraciones de partículas suspendidas totales que rebasan los límites permisibles, no obstante, es evidente el decremento registrado de este contaminante en los últimos años.

Las partículas menores a 10 micrómetros, en el año 2007 registra las concentraciones más bajas registradas de los últimos años.

Las partículas menores a 2.5 micrómetros, registradas desde el año 2004 se encuentran, aún, por encima de los valores seguros para proteger a la población.

Las partículas PM₁₀ y PM_{2.5}, se encuentran fuera de los límites establecidos en normas, sobre todo las PM_{2.5} hay que poner especial atención en este tipo de contaminante.

⁶ Tablas de los contaminantes obtenidas de la página:

<http://www.sma.df.gob.mx/simat2/informaciontecnica/index.php?opcion=4&opciondifusion=29> el 19 de julio 2010

Por lo anterior se puede establecer que los contaminantes *PM 2.5 micrómetros* y *PM10*, están fuera de normas y el NO_2 presenta tendencia decreciente pero no regular, por lo que puede preocupar su emisión, y en ese sentido, se hará énfasis en el análisis de estos tres componentes.

Preguntas de investigación

- ✓ ¿Los modelos de series de tiempo son adecuados para analizar y pronosticar los niveles de los contaminantes del aire que mide el IMECA en la zona metropolitana de la ciudad de México?
- ✓ ¿Hay algunos componentes de la contaminación que mide el IMECA que muestran patrones de comportamiento que pongan en riesgo la salud de los habitantes. ¿Será posible identificar de manera oportuna estos riesgos y recomendar acciones preventivas?
- ✓ ¿Se pueden identificar los eventos principales que han tenido una influencia significativa en el nivel de contaminantes? (Picos)

Metodología a seguir.

- 1 Revisión bibliográfica.
- 2 Recolección de datos.
- 3 Determinar modelo de la serie de tiempo.
- 4 Hacer pronósticos. Uso de paquete de cómputo.
- 5 Conclusiones.

Para poder desarrollar el proyecto se requieren diversos elementos como referencias bibliográficas, conocer la teoría existente para resolver problemas similares al que nos hemos planteado y así llegar a resultados y conclusiones relevantes.

Este estudio será una comparación y una actualización con los estudios que ya se han hecho.

1 Revisión bibliográfica.- conseguir información acerca de cada uno de los componentes del IMECA, es decir, una base de datos histórica. Se deben analizar los

pronósticos en base a su clasificación de largo o corto plazo. Los procedimientos de pronósticos pueden también clasificarse de acuerdo con su tendencia a ser más cuantitativos, tecnológicos o cualitativos.

2 Recolección de datos.- Sugiere la importancia de obtener datos válidos y confiables, es decir, asegurarse que son correctos. Lo anterior implica también que los datos deben ser pertinentes y representativos de las circunstancias para las cuales serán utilizados. Asimismo, deben ser consistentes y cuidar que sean uniformes, se deben hacer ajustes para mantener la consistencia en los patrones históricos. Con frecuencia este paso es el mayor reto de todo el proceso de pronóstico y el más difícil de controlar, ya que los pasos siguientes se efectúan sobre los datos, sean o no relevantes para el problema en cuestión. Las fuentes para obtener estos datos son: Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) y Gobierno del Distrito Federal (GDF).

3 Determinación del modelo de la serie de tiempo.- Implica ajustar los datos reunidos en un modelo de pronóstico que sea el adecuado para minimizar el error del pronóstico. Entre más sencillo sea el modelo, será mejor para lograr la aceptación del proceso. Con frecuencia se debe establecer un balance entre un enfoque de pronóstico complejo que ofrezca ligeramente más precisión y un enfoque sencillo que sea fácil de entender y aplicar por quienes toman las decisiones, de manera que lo utilicen efectivamente. Es obvio que los elementos de juicio forman parte de este proceso de selección.

Las técnicas de pronóstico que son utilizadas actualmente fueron desarrolladas en el siglo XIX; un ejemplo de ello son los análisis de regresión. Sin embargo, con el desarrollo de técnicas de pronóstico más complejas y el advenimiento de las computadoras, los pronósticos reciben más atención durante los años recientes, como las siguientes:

- Los pronósticos y suavizamientos simples.
- Los métodos de análisis de tendencias.
- Los modelos de descomposición.
- Los promedios móviles.

- Los suavizamientos exponenciales.
- Los suavizamientos exponenciales dobles.
- Modelos Box Jenkins, entre otros.

4 Hacer pronósticos, uso de paquete de cómputo.- MINITAB nos brinda soluciones para calidad y estadística. La barra de menú es donde se eligen los comandos. La barra de herramientas muestra botones para funciones que se utilizan comúnmente.⁷

5 Conclusiones.- En esta parte se resumen los aspectos más importantes de los resultados, se revisarán los objetivos que se plantearon para asegurarse que cada una de las conclusiones obtenidas contesta a los objetivos planteados.

⁷ <http://www.aulafacil.com/pronosticos-investigacion/curso/Lecc-5.htm> consultada el 20 de agosto 2010

Capítulo 1

Panorama de la contaminación del aire

Introducción

Si bien ha habido un gran avance en la elaboración de planes de acción para mejorar la calidad del aire en zonas urbanas, principalmente en los países desarrollados, un número considerable de personas que viven en áreas urbanas (alrededor de 1.500 millones ó 25% de la población mundial) aún están expuestas a altas concentraciones de compuestos gaseosos y partículas en el aire que respiran, es por ello, que actualmente varios países están preocupados en tomar algunas iniciativas para reducir sus efectos.⁸

Este capítulo tratará sobre algunos organismos públicos preocupados por los altos niveles de contaminación del aire, y las medidas que se han implementado al respecto, así como del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT), organismo público del Distrito Federal, encargado de vigilar y evaluar el estado de la calidad del aire en la Ciudad de México y se analizará la difusión de la información para dar cumplimiento a los requerimientos de la normatividad vigente.

1.1 La calidad del aire en el área metropolitana

Estudios sobre la calidad del aire

El deterioro de la calidad del aire en la Ciudad de México es el resultado de la interacción de la ciudad con su entorno natural. La dinámica urbana, las actividades diarias vinculadas con la actividad económica y social, el consumo de combustibles por la industria y el transporte, las condiciones naturales del Valle, la expansión de la mancha urbana, el clima y las condiciones fisiográficas, entre otras, influyen notablemente en la concentración y comportamiento de los contaminantes del aire.⁹

⁸ <http://www.cepis.org.pe/bvsci/fulltext/guiasaire.pdf> consultado el 25 de octubre 2010

⁹ http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/informe2008/informe_anual_2008.pdf consultada el 25 de octubre 2010

La calidad del aire es un tema importante no sólo en el Área Metropolitana del Distrito Federal o en otras ciudades de la República Mexicana, sino también ha sido tema de minuciosa investigación e interés en todo el mundo, en países de población muy numerosa como China, Hong Kong, la India, Australia, y en países de Europa como Francia, Alemania, Irlanda, Italia, España, Gran Bretaña y otros países del continente Americano como Canadá, Estados Unidos, Brasil, Colombia, Argentina, Uruguay, Venezuela entre otros.

A continuación se mencionan algunas organizaciones mundiales y regionales y los esfuerzos por tener un mundo menos contaminado:

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS):

Es la Unidad de Saneamiento Básico del Área de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental (SDE) de la Organización Panamericana de la Salud (OPS), funciona en Lima, Perú.

Acciones: Cooperar con los países de las Américas en el control de los factores de riesgo vinculados con las deficiencias o ausencias en saneamiento ambiental básico que, directa o indirectamente, afectan la salud de sus poblaciones.¹⁰

Fondo Mundial de la Naturaleza (WWF):

Organización conservacionista independiente del mundo. Sus mayores logros de conservación residen en la creación y manejo de áreas protegidas, conservación de especies, investigación, educación y sensibilización ambiental y desarrollo e implementación de políticas ambientales.¹¹

Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDD):

Es el organismo especializado de las Naciones Unidas encargado de promover y acelerar la industrialización de los países en desarrollo, en el plano mundial, regional, nacional y sectorial.

Ayuda a los países en vías de desarrollo a alcanzar un desarrollo industrial sostenible, logrando un equilibrio entre la economía competitiva, el empleo productivo y el medio ambiente.¹²

¹⁰ <http://www.cepis.org.pe/cepis/e/cepisacerca.html> consultada el 26 de octubre 2010

¹¹ http://es.wikipedia.org/wiki/Fondo_Mundial_para_la_Naturaleza consultada el 26 de octubre 2010

¹² <http://www.cinu.org.mx/onu/estructura/mexico/org/onudi.htm> consultada el 26 de octubre 2010

Organización Meteorológica Mundial (OMM):

Es un organismo especializado de las Naciones Unidas. Es su portavoz autorizado acerca del estado y el comportamiento de la atmósfera terrestre, su interacción con los océanos, el clima que produce y la distribución resultante de los recursos hídricos.

Algunos programas científicos y técnicos de la OMM:

Programa de la Vigilancia Meteorológica Mundial (VMM), Programa Mundial sobre el Clima (PMC), Programa de Investigación de la Atmósfera y Medio Ambiente (PIAMA), Programa de Aplicaciones de la Meteorología (PAM), entre otros.¹³

En América se muestran algunos organismos dedicados al medio ambiente:

Centro Molina para Energía y el Medio Ambiente:

Organización creada en California, EUA. Objetivos; atraer expertos internacionales en ciencia, ingeniería, economía, ciencias sociales y políticas para realizar investigaciones en colaboración.

El centro ha realizado diversas actividades de investigación relacionadas a la contaminación del aire en grandes áreas urbanas, incluyendo la coordinación de la Campaña MILAGRO.¹⁴

Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA):

La CCA contribuye a la conservación, protección y mejoramiento del medio ambiente de América del Norte. Proyectos: Información Ambiental, Conservación de la Biodiversidad, Medio Ambiente, economía y sustentabilidad, Contaminantes y salud, entre otros.¹⁵

Iniciativa de Aire Limpio, Ciudades de América Latina:

Fue lanzada por el Banco Mundial para establecer un enfoque amplio para abordar los retos de la calidad del aire en América Latina. Proyecto: Iniciativa de Aire Limpio para América Latina y el Caribe 2007-2012.¹⁶

Es muy importante que la sociedad mundial desarrolle una consecuente educación ambiental, que permita como resultado que cada niño, adolescente, joven y adulto, comprenda por qué surgen problemas ambientales, qué consecuencias traen, como

¹³ http://www.wmo.int/pages/about/index_es.html consultada el 26 de octubre 2010

¹⁴ [http://mce2.org/education/Triptico_MCE2-Final%20_\(ltm%2010-16-07\).pdf](http://mce2.org/education/Triptico_MCE2-Final%20_(ltm%2010-16-07).pdf) consulta 26 de octubre 2010

¹⁵ http://www.cec.org/Page.asp?PageID=1115&BL_WebsiteID=1&AA_SiteLanguageID=3&CFID=12021799&CFTOKEN=12660720 consultada el 26 de octubre 2010

¹⁶ <http://www.cleanairnet.org/lac/1471/channel.html> consultada el 26 de octubre de 2010

evitarlos y solucionarlos; cómo cada uno de ellos, con su conducta y acción, pueden proteger el medio ambiente local y mundial.

En nuestro país existen diferentes instancias de carácter federal que se han preocupado por el estudio de la calidad del aire y sus efectos en la salud de la población, podemos citar las siguientes dependencias; la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el Instituto Nacional de Ecología (INE), la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), la Secretaría de Energía (SENER), El Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), la Secretaría de Salud, el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP), el Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias (INER), la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), el Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED) y la Información Meteorológica, entre otras.

Asimismo, en el ámbito del Distrito Federal intervienen la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, la cual cuenta con un *Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2009-2012* donde se propone y establece la política ambiental en materia de residuos, plantea objetivos, acciones y metas.



Figura 1.1

cristino.tigblog.org/archive/11_2008 octubre 2010

Otras organizaciones en el Distrito Federal preocupadas en este tema de la contaminación son: el Programa de Cambio Climático, el Sistema de Aguas de la

Ciudad de México (SACM), la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT) y la Secretaría de Salud.¹⁷



Figura 1.2

www.gobierno.com.mx/secretaria-de-salud/ octubre 2010

1.2 Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México: SIMAT

1.2.1 Antecedentes

De acuerdo al lugar en que se encuentra asentada la Ciudad de México y su zona conurbada, corresponde a la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal el estudio, vigilancia y monitoreo de la calidad del aire en toda la zona Metropolitana del Valle de México, actividades que se llevan a cabo mediante el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT). Ver figura 1.3



Figura 1.3

www.pm2punto5.com/?tag=sma
9 de noviembre 2010

El antecedente histórico de este sistema data de hace más de 40 años, cuando el estudio del aire aparece como el principal objeto de preocupación entre los distintos problemas ambientales en la Ciudad de México, mismo que comenzó a ser relevante a partir de 1940 debido al proceso de desarrollo de carácter centralista que propició una aglomeración industrial y poblacional.

¹⁷ <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/index.php?opcion=37> consultado el 20 de octubre 2010

En esta época la Ciudad de México, tuvo una expansión urbana acelerada que alcanzó a los municipios vecinos del Estado de México, en un proceso de conurbación que continúa hasta nuestros días, provocando la disminución de áreas boscosas, la pérdida de terrenos destinados a la producción agrícola y el déficit en el suministro de agua potable.

La calidad del aire se deteriora y se evidencia cuando la visibilidad disminuye y en ese sentido en los primeros años de la década de los 40, ésta fluctuaba entre 4 y 10 kilómetros y 10 años después entre 2 y 4 kilómetros, situación que motivó la preocupación de las autoridades competentes y los científicos por conocer los riesgos sanitarios asociados con la exposición de la población a los contaminantes atmosféricos, lo cual da inicio a los primeros esfuerzos por conocer las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en la Ciudad de México, iniciándose así, un proceso histórico en el que intervinieron numerosas instituciones.

La Secretaría de Salubridad y Asistencia en 1958 realiza el muestreo y análisis de gases en la atmósfera y se detecta la presencia del ciclo fotoquímico del ozono en la Ciudad de México. Para 1960 se publican los resultados del “Estudio del Depósito de Polvo por Gravedad en la Ciudad de México” por parte de la revista Ingeniería Química de la UNAM.

Es hasta 1966 en que se integra la primera red de monitoreo con 4 estaciones localizadas en Tlalnepantla, el Aeropuerto, el Centro de la Ciudad y en Tacuba, que incluyen equipos para medir dióxido de azufre, partículas suspendidas y polvo sedimentable.

La operación de la Red Panamericana de Muestreo Normalizado se inicia a nivel nacional en el mes de agosto de 1967, con el apoyo de la Organización Panamericana de la Salud y se instalan en la Ciudad de México 14 estaciones para medir dióxido de azufre (Método de peróxido de hidrógeno), partículas suspendidas (método de reflectometría) y polvo sedimentable (gravimetría). Dicha red concluye su operación en 1972, debido a que los métodos utilizados presentaron problemas técnicos como son: interferencia de gases en la medición de dióxido de azufre; falta de curvas de

calibración en la medición de partículas suspendidas y ausencia de correlación con estudios de salud en el caso del polvo sedimentable.

La publicación de la “Ley Para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental” en el mes de marzo de 1971, así como la aplicación de su reglamento, establecen la normatividad en la Ciudad de México sobre la calidad del aire.

La historia de la gestión ambiental en México se da inicio con la creación de la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente en el año de 1972, en el que se modifica el sistema de medición de dióxido de azufre por el método de Pararosanilina y la medición de partículas suspendidas por el Análisis Gravimétrico siendo ambos métodos usados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

El gobierno de México participa en un programa conjunto de protección ambiental con el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo y se realiza la adquisición gradual de 22 equipos de alto volumen para medir partículas y reforzar los equipos para medir gases contaminantes en 14 estaciones existentes de la Ciudad de México. Asimismo se instalaron 22 nuevas estaciones para medir partículas con equipos de alto volumen, entre estas, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y ozono mediante burbujeadores.

La medición continúa y en tiempo real de gases contaminantes y parámetros meteorológicos (dirección y velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) con transmisión a un centro receptor de datos, fue posible por la introducción de equipo automático. A esta red de monitoreo se le conoció como “Red Phillips” que operó hasta 1976 pero técnicamente se reportó que su información no fue del todo confiable.

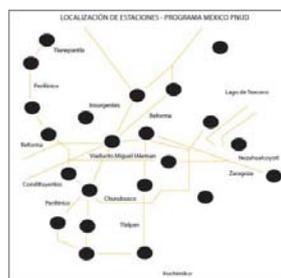


Figura 1.4 Localización de estaciones
<http://www.sma.df.gob.mx/simat2/index.php?opcion=10#crono>
Noviembre 2010

En 1982 se publican las Normas Oficiales Mexicanas de Protección a la Salud por Contaminación Atmosférica y 2 años después se establece la necesidad de contar con Sistemas de Monitoreo de Contaminación Atmosférica en el Plan Nacional de Desarrollo, entrando en vigor un Sistema de Monitoreo denominado Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) con 25 estaciones, de las cuales se establecen 19 en el Distrito Federal y 6 en el Estado de México y es operada por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE). En esta etapa los contaminantes que se registran son: monóxido de carbono, dióxido de azufre, ozono, partículas menores a 10 micrómetros, partículas suspendidas totales y plomo.

Es hasta 1986 en que se hace pública la información registrada en las 25 estaciones de monitoreo de la RAMA, misma que se amplía en el año de 1991 a 32 estaciones remotas y una unidad móvil, y se incrementa además el número de equipos para medir contaminantes gaseosos y parámetros meteorológicos y para 1993 el entonces Departamento del Distrito Federal, tiene la responsabilidad de operar y administrar la RAMA y se hace pública la información registrada en las 7 estaciones incorporadas en 1991.

El Departamento del Distrito Federal reactiva en 1995, el Programa de Precipitaciones Ácidas en la zona metropolitana de la Ciudad de México, que ya contaba con 9 años de antigüedad y para 1997 se introducen equipos automáticos en las estaciones y se diseña una red formal para el monitoreo de lluvia ácida con 16 estaciones, además de que se inicia la medición de radiación solar ultravioleta tipo A y B en la estación Tecnológico de Monterrey (TEC) y se elabora el Índice de Radiación Solar o Índice UV, el cual se difunde cada hora desde 1997 con la finalidad de proteger la salud de la población.

La radiación global se comienza a registrar en 1998 en la estación Tláhuac y dicha información complementa la medición de radiación solar, siendo un insumo valioso de posteriores estudios de investigación. Asimismo se realiza la primera publicación de la página del IMECA.

A partir del año 2000 la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, a través de la Dirección General de Gestión Ambiental del Aire, inicia la integración del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT)

Por su parte de septiembre de 2005 a Septiembre de 2006 se realiza una campaña para medir compuestos orgánicos volátiles (COV's) con la colaboración del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA) y la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, culminando la reactivación del laboratorio de Análisis Ambiental con la instalación y puesta en marcha de los laboratorios de Gravimetría y Medición Atómica.

El inicio de la operación de 3 estaciones nuevas: Iztacalco, Chalco y Acolman, cierra el año de 2007 y en 2009 se retira la estación metro Insurgentes, iniciándose el monitoreo continuo de los compuestos tóxicos benceno, tolueno y xileno en la estación Merced, y se publica el nuevo sitio web del SIMAT.¹⁸

1.2.2 Componentes del Sistema de Monitoreo Atmosférico

Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA): cuenta con 34 estaciones (21 en el DF y 13 en el EDOMEX), mide continuamente ozono (O₃), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀) y partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}). Con esta información se genera el IMECA y cuando sus valores son altos se instrumenta el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA).



Figura 1.6

<http://www.sma.df.gob.mx/simat2/informaciontecnica/index.php?opcion=1&opcionsimat=4>
consultado septiembre 2010

¹⁸ <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/index.php?opcion=10#crono> consultada el 10 de septiembre 2010

Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET): cuenta con 16 estaciones (10 en el DF y 6 en el EDOMEX), mide continuamente temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, presión atmosférica, radiación fotosintéticamente activa, radiación global, radiación solar UV-A y UV-B, con esta última se genera cada hora el **Índice UV**.

Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA): cuenta con 12 estaciones (7 en el DF y 5 en el EDOMEX), mide de forma manual las concentraciones de partículas suspendidas (PST, PM₁₀ y PM_{2.5}) y plomo (Pb).

Red de Depósito Atmosférico (REDDA): mejor conocida como "red de lluvia ácida", cuenta con 16 estaciones (12 en el DF y 4 en el EDOMEX), colecta muestras de lluvia para determinar volumen, acidez, conductividad y el contenido de nitratos, sulfatos, sodio, calcio, magnesio y potasio.

Además, el SIMAT cuenta con un *Laboratorio móvil* de monitoreo atmosférico que es un importante elemento de apoyo en el análisis de la calidad del aire.

La información que se genera en los subsistemas RAMA y REDMET del SIMAT, se concentra en el **Centro de Información de la Calidad del Aire (CICA)**.

1.2.3 Tendencias hacia el futuro del SIMAT

En el futuro se prevé que el SIMAT continúe destacando a nivel nacional, para lo cual deberá consolidar los sistemas de gestión de la calidad asociados con sus procesos. Así mismo, deberá responder y adaptarse a las necesidades de información derivadas de un mejor conocimiento de la problemática de la calidad del aire y del crecimiento de la mancha urbana.¹⁹

¹⁹http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_Monitoreo_Atmosf%C3%A9rico_de_la_Ciudad_de_M%C3%A9xico consultada el 27 de octubre 2010

Resumen y conclusiones

El aire se contamina principalmente a consecuencia de una gran variedad de actividades que desarrollamos de manera cotidiana; tanto en el nivel individual (en el uso del automóvil, fumar, la quema de basura o la utilización de servicios, etc.), como en el nivel institucional o empresarial (por ejemplo, en la quema de combustible en la industria o el uso de solventes, entre otras).

El resultado de estas actividades es la emisión de gases o partículas contaminantes al aire que pueden afectar nuestra salud y a nuestros ecosistemas.

Es un gran reto mejorar la calidad del aire para proteger la salud de la población, en México y en el mundo ya se están implantando medidas que han favorecido la disminución de las concentraciones de los contaminantes, pero se requiere un mayor esfuerzo para llegar al objetivo; proteger a la mayoría de las personas de los efectos sanitarios de la contaminación atmosférica.

Al reducir los niveles de contaminación del aire, podemos ayudar a los países a disminuir la carga de morbilidad generada por las infecciones respiratorias, las cardiopatías y el cáncer de pulmón. Además, las medidas destinadas a limitar las repercusiones directas de la contaminación atmosférica reducirán también las emisiones de gases que contribuyen al cambio climático y redundarán en otros beneficios para la salud.

El SIMAT (Sistema de Monitoreo Atmosférico) tiene como objetivo evaluar la calidad del aire en la Ciudad de México, como medida de prevención para protección de la salud de sus habitantes.

Está integrado por cuatro subsistemas operativos especializados, una unidad de apoyo para trabajos en campo y un Laboratorio de Transferencia de Estándares de Calibración:

- **RAMA** - Red Automática de Monitoreo Atmosférico.
- **REDMA** - Red Manual de Monitoreo Atmosférico
- **REDDA** - Red de Depósito Atmosférico
- **REDMET** - Red Meteorológica
- **Unidad Móvil** de Monitoreo Atmosférico
- Laboratorio de Transferencia de Estándares de Calibración

Capítulo 2

El Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) como indicador de la calidad del aire

Introducción

El presente capítulo tratará acerca de cómo se realiza la medición de la contaminación del aire en la Ciudad de México, esto es a través del Índice Metropolitano de la calidad del aire (IMECA), se dará su definición y su actual cálculo, cuáles son sus componentes y cómo se mide cada uno de ellos.

2.1 Medición de la contaminación del aire

La Ciudad de México tiene una superficie de 1,479 kilómetros cuadrados, donde viven casi 9 millones de personas. Es uno de los ámbitos urbanos más extensos de todo el mundo, tanto por población como por extensión territorial. Prácticamente lo envuelve el Estado de México, del que originalmente formaba parte.²⁰

Por su posición geográfica, el Distrito Federal es una zona de tierras templadas. La presencia de altas montañas en los alrededores del valle de México es un factor que impide el paso de las nubes de lluvia que provienen del Golfo de México o del Océano Pacífico. Por ello, las precipitaciones en la capital mexicana no son abundantes. La temporada húmeda en el Distrito Federal abarca de mayo a noviembre, aunque la pluviosidad es mayor entre los meses de junio y agosto.²¹

La Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal elabora y transmite cada hora el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) a los medios de comunicación.

²⁰ <http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/6963/1/A2.769.pdf> consultada 27 de octubre 2010

²¹ [http://es.wikipedia.org/wiki/Geograf%C3%ADa_del_Distrito_Federal_\(M%C3%A9xico\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Geograf%C3%ADa_del_Distrito_Federal_(M%C3%A9xico)) consultada 27 de octubre 2010

2.2 Índice Metropolitano de la Calidad del Aire: IMECA

Es una escala adimensional que sirve para calificar la calidad del aire con respecto a los contaminantes atmosféricos considerados criterio, se abrevia como IMECA.

Las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental establecen límites permisibles para proteger la salud de la población ante los contaminantes atmosféricos. Este límite permisible equivale en el IMECA a 100 puntos, por lo que si el valor del IMECA es menor a 100 significa que hay menos riesgo de enfermarse y si es mayor 100 el riesgo se incrementa.

De acuerdo con la Norma Técnica Ambiental del Distrito Federal (NADF-009-AIRE-2006), si el IMECA está entre **0 y 50** la calidad del aire es “**Buena**”, cualquier persona puede realizar actividades al aire libre debido a que el riesgo es menor. Cuando el IMECA tiene un valor entre **51 y 100** la calidad del aire se califica como “**Regular**” y es posible que los grupos sensibles de la población, como son los niños, personas de la tercera edad y con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma, pueden presentar molestias o síntomas respiratorios.

Cuando el IMECA rebasa los 100 puntos y continúa aumentando, también aumenta el riesgo para la salud de la población. Un IMECA entre **101 y 150** puntos significa que la calidad del aire es “**Mala**” para la población general y en particular para los grupos sensibles de la población, por lo que es recomendable atender la presencia de cualquier síntoma o molestia al realizar actividades al aire libre, como es el ejercicio vigoroso.

Si el IMECA rebasa los **150** puntos y sigue aumentando, la Norma Técnica Ambiental del Distrito Federal señala que la condición de calidad del aire puede pasar a ser es “**Muy Mala**” o “**Extremadamente Mala**” y en consecuencia los efectos de la salud pueden ser mayores y adversos para la población general y con mayor los grupos sensibles.

En la Ciudad de México el IMECA se complementa con colores para facilitar su comprensión por parte de la población, “**verde**” para el intervalo de 0 a 50 puntos,

“**amarillo**” para el intervalo de 51 a 100 puntos, “**naranja**” para el intervalo de 101 a 150 puntos, “**rojo**” para el intervalo de 151 a 200 y “**púrpura**” si es mayor a 200.

Valores	Clasificación	Recomendaciones
0 - 50	Buena	Adecuada para llevar a cabo actividades al aire libre.
51 - 100	Regular	Posibles molestias en niños, adultos mayores y personas con enfermedades.
101 - 150	Mala	Causante de efectos adversos a la salud en la población, en particular los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma.
151 - 200	Muy mala	Causante de mayores efectos adversos a la salud en la población en general, en particular los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma.
>200	Extremadamente mala	Causante de efectos adversos a la salud de la población en general. Se pueden presentar complicaciones graves en los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma.

El IMECA se reporta cada hora para cada una de las 34 estaciones automáticas de monitoreo de la calidad del aire del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) y para cada una de las 5 zonas en las que se divide la Ciudad de México y su Zona Metropolitana. Si en alguna estación de una zona cualquiera la calidad del aire es mala o muy mala, entonces se considera que toda la zona tiene mala calidad del aire para esa hora.

2.3 Cálculo actual del IMECA

A fines de 1977 la Dirección General de Saneamiento Atmosférico de la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente de la Secretaría de Salubridad y Asistencia, desarrolló el Índice Mexicano de la Calidad del Aire “IMEXCA”, con la finalidad de informar al público de manera precisa y oportuna.

El IMEXCA se comenzó a publicar el 6 de diciembre de 1977, su estructura técnica general se basó en el Pollutant Standard Index (PSI) utilizado en los Estados Unidos, es decir, funciones lineales segmentadas donde los puntos de quiebre correspondían a las normas primarias de calidad del aire de los Estados Unidos, debido a que en México no existían normas oficiales de calidad del aire, ni criterios de episodios, ni niveles de daño significativo.

En 1982 se diseñó el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire "IMECA", cuya metodología transforma a una escala adimensional las concentraciones de los contaminantes criterio. A partir de enero de 1986 el IMECA se empezó a difundir a la población a través de diversos medios.

En noviembre del año 2006 se publicó en la Gaceta Oficial del Distrito Federal la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-009-AIRE-2006, que establece los requisitos para elaborar el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire de los contaminantes criterio, ozono (O₃), partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀), partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂) y monóxido de carbono (CO). Esta Norma Ambiental incluye los algoritmos para el cálculo del IMECA:

INTERVALOS (IMECA)	CONCENTRACIONES	ECUACIONES
Partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀)		
PM₁₀		
IMECA	µg/m ³	Ecuaciones
0-50	0-60	
51-100	61-120	$I[PM_{10}] = C[PM_{10}] * 5/6$
101-150	121-220	
151-200	221-320	$I[PM_{10}] = 40 + C[PM_{10}] * 0.5$
>200	>320	$I[PM_{10}] = C[PM_{10}] * 5/8$
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5})		
PM_{2.5}		
IMECA	µg/m ³	Ecuaciones
0-50	0-15.4	$I[PM_{2.5}] = C[PM_{2.5}] * 50/15.4$
51-100	15.5-40.4	$I[PM_{2.5}] = 20.50 + C[PM_{2.5}] * 49/24.9$
101-150	40.5-65.4	$I[PM_{2.5}] = 21.30 + C[PM_{2.5}] * 49/24.9$
151-200	65.5-150.4	$I[PM_{2.5}] = 113.20 + C[PM_{2.5}] * 49/84.9$
>200	>150.4	$I[PM_{2.5}] = C[PM_{2.5}] * 201/150.5$
Ozono (O₃)		
O₃		
IMECA	ppm	Ecuaciones
0-50	0-0.055	
51-100	0.056-0.110	
101-150	0.111-0.165	$I[O_3] = C[O_3] * 100/0.11$
151-200	0.166-0.220	
>200	>0.220	
Dióxido de Nitrógeno (NO₂)		
NO₂		
IMECA	ppm	Ecuaciones
0-50	0-0.105	$I[NO_2] = C[NO_2] * 50/0.105$
51-100	0.106-0.210	$I[NO_2] = 1.058 + C[NO_2] * 49/0.104$
101-150	0.211-0.315	$I[NO_2] = 1.587 + C[NO_2] * 49/0.104$
151-200	0.316-0.420	$I[NO_2] = 2.115 + C[NO_2] * 49/0.104$
>200	>0.420	$I[NO_2] = C[NO_2] * 201/0.421$
Dióxido de Azufre (SO₂)		
SO₂		
IMECA	ppm	Ecuaciones
0-50	0-0.065	
51-100	0.066-0.130	
101-150	0.131-0.195	$I[SO_2] = C[SO_2] * 100/0.13$
151-200	0.196-0.260	
>200	>0.260	
Monóxido de Carbono (CO)		
CO		
IMECA	ppm	Ecuaciones
0-50	0-5.50	$I[CO] = C[CO] * 50/5.50$
51-100	5.51-11.00	$I[CO] = 1.82 + C[CO] * 49/5.49$
101-150	11.01-16.50	$I[CO] = 2.73 + C[CO] * 49/5.49$
151-200	16.51-22.00	$I[CO] = 3.64 + C[CO] * 49/5.49$
>200	>22.00	$I[CO] = C[CO] * 201/22.01$

NOTA: Los valores que aparecen en los intervalos de cada contaminante, se refieren a múltiplos del límite que señala su Norma Oficial Mexicana (NOM) Salud Ambiental. La excepción son las PM_{2.5} para las cuales se emplean los intervalos propuestos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA por sus siglas en inglés).

2.4 Forma en que se miden y reportan los contaminantes criterio en la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal GDF

La forma como se miden y reportan las concentraciones de gases y las partículas que se miden en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) con equipos manuales o automáticos, por parte de la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal es como se indica en la siguiente tabla 2.1:

Contaminante	Norma Oficial Mexicana métodos de medición	Forma de reporte
PM ₁₀ manual	No existe	La concentración se reporta a las condiciones locales de presión y temperatura.
PM _{2.5} manual	No existe	La concentración se reporta a las condiciones locales de presión y temperatura.
PM ₁₀ automático	No existe	La concentración se reporta a las condiciones locales de presión y temperatura.
PM _{2.5} automático	No existe	La concentración se reporta a las condiciones locales de presión y temperatura.
O ₃	<u>NOM-036-SEMARNAT-1993</u>	La concentración se reporta en partes por millón (ppm)
NO ₂	<u>NOM-037-SEMARNAT-1993</u>	La concentración se reporta en partes por millón (ppm)
SO ₂	<u>NOM-038-SEMARNAT-1993</u>	La concentración se reporta en partes por millón (ppm)
CO	<u>NOM-034-SEMARNAT-1993</u>	La concentración se reporta en partes por millón (ppm)
PST	<u>NOM-035-SEMARNAT-1993</u>	La concentración se reporta a las condiciones de referencia de presión y temperatura.

Tabla 2.1

tomada de la página del SIMAT.²² Octubre 2010

²² <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/informaciontecnica/index.php?opcion=4&opciondifusion=24>
consultada el 28 de octubre 2010

Resumen y conclusiones

El IMECA se obtiene a partir de las mediciones de la calidad del aire que realiza el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. Se emplea para comunicar a la población de la Ciudad de México y su área metropolitana el grado de contaminación y el nivel de riesgo que este representa para la salud humana, así como las recomendaciones o acciones que pueden realizar para su protección. Se calcula empleando los promedio horarios de la medición de los contaminantes ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO) y partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}).

Se tienen niveles establecidos de concentración y tiempos de exposición de los contaminantes donde el ciudadano promedio puede desenvolverse sin que se afecte de forma significativa su salud. Estos niveles son establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas para la Calidad del Aire. Los niveles de la norma ambiental para cada contaminante son diferentes, ya que la vulnerabilidad del ser humano es diferente ante cada tipo de contaminante. El IMECA toma el valor de concentración y el tiempo de exposición que establece la norma ambiental para cada contaminante y lo asigna a los 100 puntos IMECA. De esta manera para cualquier contaminante se tiene la misma escala de ponderación en la unidad adimensional del IMECA.

El cálculo del IMECA implica transformar e integrar los datos de concentraciones de un grupo de contaminantes, conocidos como contaminantes criterio, en valores independientes de las unidades de los contaminantes considerados (valores adimensionales), mismos que, por construcción, indican los valores de las normas de calidad del aire para un contaminante determinado cuando el IMECA toma el valor de 100 puntos.

Los contaminantes del aire se han clasificado como contaminantes criterio y contaminantes no criterio. Los primeros, se han identificado como perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos. Se les llamó contaminantes criterio porque fueron objeto de evaluaciones publicadas en documentos de calidad del aire en los Estados Unidos, con el objetivo de establecer niveles permisibles que protegieran la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población.

Actualmente el término “contaminantes criterio” ha sido adoptado en muchos países, y son:

1. Dióxido de azufre (SO₂)
2. Dióxido de nitrógeno (NO₂)
3. Material Particulado (PM)
4. Monóxido de carbono (CO)
5. Ozono (O₃)

Para cada contaminante criterio se han desarrollado guías y normas. Las guías son recomendaciones que establecen los niveles de exposición a contaminantes atmosféricos, a fin de reducir los riesgos o proteger de los efectos nocivos. Las normas establecen las concentraciones máximas de los contaminantes atmosféricos que se permiten durante un período definido, estos valores límite son diseñados con un margen de protección ante los riesgos y tienen la finalidad de proteger la salud humana y el medioambiente.

El IMECA se publica cada hora para la población de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, que abarca la totalidad del Distrito Federal y la zona conurbada del Estado de México.

Capítulo 3

Descripción y comportamiento histórico de los componentes del IMECA

Introducción

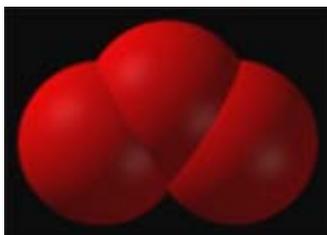
A continuación se describen las principales características de cada uno de los componentes del IMECA:

3.1 Ozono

El ozono (O_3), es un gas invisible e incoloro, altamente corrosivo e irritante, componente natural de la estratosfera, en la que desempeña un efecto filtrante de la radiación ultravioleta muy positivo. Sin embargo, es un contaminante en la troposfera.

También se le considera un contaminante secundario, ya que se forma por reacción entre otros gases contaminantes (óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles) con la participación de la radiación solar. Hay, no obstante, una cierta presencia natural de ozono troposférico, debido fundamentalmente a intrusiones del ozono estratosférico y al nivel de fondo ocasionado por la reacción de los óxidos de nitrógeno naturales y determinados compuestos de origen vegetal.

Se forma a partir de reacciones en las que participan óxidos de nitrógeno, hidrocarburos volátiles y radiación solar.



Representación tridimensional del Ozono

3.1.1 Evolución en la atmósfera

El ozono es inestable y presenta una fuerte tendencia a perder uno de los átomos de oxígeno que puede combinarse con otros elementos o compuestos, oxidándolos, lo que justifica su elevado poder oxidante y, consecuentemente, sus efectos corrosivos tanto sobre diferentes materiales y de tipo irritante como sobre las mucosas de los seres vivos.

Es un gas muy reactivo, que actúa sobre los tejidos más superficiales con los que entra en contacto: los epitelios del aparato respiratorio. Dentro del aparato respiratorio, la zona que recibe una dosis superior es el área centroacinar, lugar de unión de los últimos bronquiolos y los alvéolos pulmonares. Esto es debido a su pequeña relación volumen/superficie, que facilita el contacto del ozono con las superficies tisulares. La proporción de ozono que pasa a la sangre es despreciable.

La dosis efectiva de ozono que recibe un individuo al respirar, es función directa de la concentración de ozono existente, del tiempo de exposición y del volumen de aire respirado por unidad de tiempo. Este último puede llegar a quintuplicarse al realizar ejercicios físicos. Por tanto, el nivel de actividad física es un factor muy importante en la dosis recibida.

La concentración de ozono en interiores con las ventanas cerradas o con aire acondicionado es muy inferior a la ambiental, del orden del 20% de esta última. Sin embargo, en interiores muy ventilados, la concentración es del 80% de la exterior. Estos factores también influyen de forma importante en la exposición.

3.1.2 Evolución del ozono

El ozono muestra un decremento en sus concentraciones máximas con respecto a los lineamientos y normas vigentes. En los últimos dos años se ha incrementado el número de días por debajo del límite máximo permitido. Sin embargo, todavía existe una situación de riesgo por exposición, sobre todo en la región suroeste.

En la Figura 3.1 se muestra la gráfica de tendencia del Ozono según los datos reportados en la página del SIMAT.

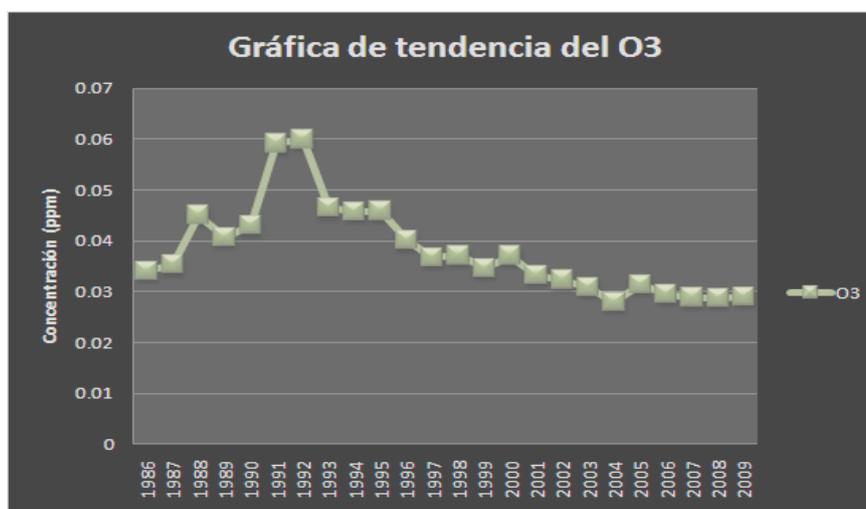


Figura 3.1

3.1.3 Efectos en la salud

La acción del ozono comienza por un ataque oxidativo sobre los lípidos insaturados y algunos de los aminoácidos que forman las proteínas, causando alteraciones funcionales en la población. Estas reacciones oxidativas pueden sucederse, dando lugar a la “cascada de ozonización”. Sus numerosos subproductos pueden diseminarse a tejidos más profundos.

Las lesiones morfológicas características tras la exposición a ozono se han descrito fundamentalmente en el área centroacinar. Algunas células de los epitelios de esta zona mueren y se producen desarrollos anormales de tejido para sustituirlas, que en caso de exposición continuada, pueden dar lugar a una fibrosis de la zona afectada.

Los estudios epidemiológicos han puesto de manifiesto incrementos significativos en los casos de asma atendidos en servicios de urgencias de los hospitales, relacionados con incrementos en la concentración ambiental de ozono. Las consultas a urgencias por crisis asmáticas pueden aumentar más de un 30% al superar durante periodos prolongados los 220 m/m³ de ozono. Los ingresos por neumonía en ancianos también parecen guardar relación con las concentraciones de ozono. En el caso de otras

patologías, como la bronquitis crónica y el enfisema, la posible relación no ha podido ser aún esclarecida.

La relación entre asma y ozono se debe a un efecto de predisposición (hiperreactividad) generado por el ozono en las vías respiratorias, que tiene como consecuencia el desarrollo de un proceso inflamatorio y broncoconstrictor en respuesta a estímulos potencialmente irritantes, pero cuyo efecto sería mucho menor en condiciones normales.

La concentración de ozono a nivel del mar, puede oscilar alrededor de $0,01 \text{ mg kg}^{-1}$. Cuando la contaminación debida a los gases de escape de los automóviles es elevada y la radiación solar es intensa, el nivel de ozono aumenta y puede llegar hasta $0,1 \text{ kg}^{-1}$.

Las plantas pueden ser afectadas en su desarrollo por concentraciones pequeñas de ozono que es altamente tóxico para ellas. Afecta a las paredes celulares, disminuye la actividad fotosintética y perjudica su crecimiento, provocando una disminución de la vegetación natural y de la producción agrícola.

El hombre resulta afectado por el ozono a concentraciones entre $0,05$ y $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$, causándole irritación de las fosas nasales y garganta, así como sequedad de las mucosas de las vías respiratorias superiores.

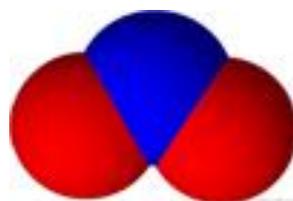
3.1.4 Límites permitidos

La Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993 establece límites máximo permisible para ozono de 0.11 ppm , lo que es equivalente a 216 ug/m^3 en una hora, para no rebasarse ninguna vez al año, para protección a la salud de la población susceptible.²³

²³ <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/informaciontecnica/index.php?opcion=2&opcionmonitoreo=1>
Consultado el 29 de julio de 2010

3.2 Dióxido de nitrógeno (NO₂)

En la naturaleza existe una concentración de dióxido de nitrógeno de 10 a 50 partes por billón, producida por la intrusión de los óxidos de nitrógeno estratosférico, la quema de biomasa, la actividad volcánica y bacteriana, así como por las descargas eléctricas durante las tormentas. Las emisiones antropogénicas de óxidos de nitrógeno (NO_x) se generan de los procesos de industriales y por el uso de combustibles fósiles. De la actividad industrial se producen principalmente óxido nítrico a partir de la reacción del N₂ y O₂ atmosféricos, durante la combustión a alta temperatura. La cantidad total emitida de monóxido de nitrógeno (NO) dependerá de las condiciones en las que se realiza la combustión.



Representación
tridimensional del
Dióxido de Nitrógeno

Durante el día el dióxido de nitrógeno puede reaccionar en fase gaseosa con el radical hidroxilo HO para formar ácido nítrico (HNO₃). En la noche el dióxido de nitrógeno puede reaccionar con el ozono para formar el radical nitrato, el cual es uno de los principales contribuyentes en la química de la troposfera. Debido a que absorbe fuertemente en la región del espectro correspondiente al rojo, fotoliza rápidamente durante el día regenerando el dióxido de nitrógeno para participar en la fotoquímica diurna.

La química de los óxidos de nitrógeno en la atmósfera es fundamental para los procesos que ocurren en los ambientes urbanos contaminados, ésta regula la eficiencia catalítica en la producción de ozono, determina la partición de hidróxido (OH) y el radical hidroperóxido (OH₂), define la cantidad de HNO₃ y nitratos producidos, y en conjunto determina la magnitud y dirección de la producción o destrucción de ozono.

En su proceso de transformación este contaminante forma nitratos, es decir, sales que pueden ser transportadas en el material particulado respirable y que en presencia de

humedad, forman ácidos. Estos ácidos son una parte importante del material particulado secundario (PM2.5), que tiene efectos nocivos en la salud.

En las emisiones de óxidos de nitrógeno, tenemos que las fuentes móviles contribuyen con más del 81%, el cual se distribuye principalmente entre los autos particulares con un 27%, los vehículos de menos de 3 ton con un 15%, los tractocamiones con el 11%, los taxis con el 8% y las pick up con un 5%. Sin embargo las fuentes puntuales pueden considerarse también como emisoras muy importantes de óxidos de nitrógeno ya que en conjunto emiten el 13% de los NOx, siendo la generación de energía eléctrica la que más contribuye con el 6% y la de productos minerales no metálicos con el 2%. Las fuentes de área en este contaminante también tienen impacto, puesto que la emisión total es de un 6% distribuida entre, la combustión habitacional y comercial principalmente.²⁴

3.2.1 Evolución

El monitoreo atmosférico de la calidad del aire ha demostrado un tendencia decreciente en la concentración de este contaminante, sin embargo, esta tendencia no es regular, debido a que su formación es principalmente de tipo secundario, su disminución está en función del control de sus fuentes de emisión.

En la Figura 3.2 se muestra la gráfica de tendencia del Dióxido de nitrógeno según los datos reportados en la página del SIMAT.

²⁴ http://www.sma.df.gob.mx/simat/programas_ambientales/anexo/elementos_hnc.pdf consulta 30 de octubre 2010

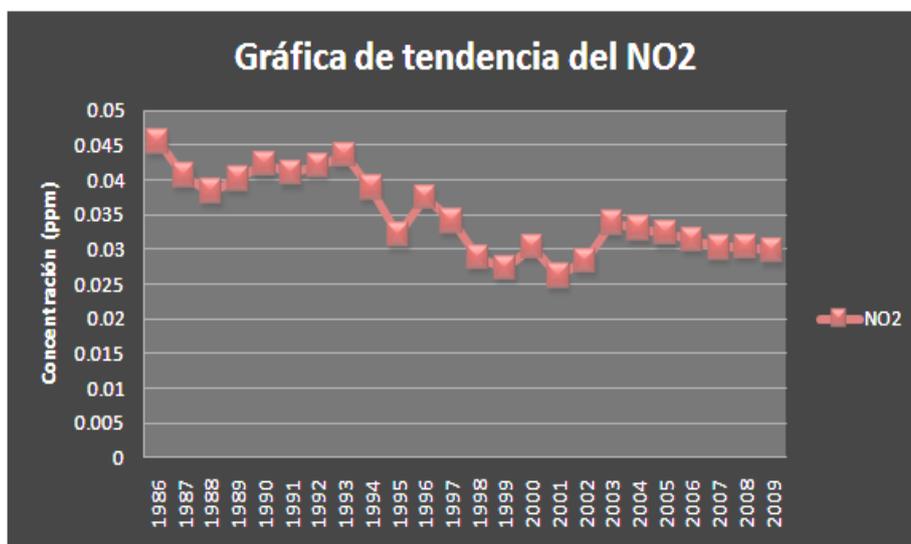


Figura 3.2

3.2.2 Efectos en la salud

El óxido de nitrógeno (NO) se oxida, formando dióxido de nitrógeno cuando entra en contacto con el aire (NO₂). Por ello, la intoxicación por gases nitrosos se debe, principalmente, al dióxido de nitrógeno y produce trastornos no menores en la salud como los siguientes:

- Irritación de la piel y mucosas.
- Penetra los alvéolos.
- Aumento del metabolismo antioxidante.
- Daño celular en el pulmón.

La formación de ácido nitroso/nítrico en el tejido pulmonar daña las paredes capilares, causando edema luego de un período de latencia de 2-24 horas. Los síntomas típicos de la intoxicación aguda son ardor y lagrimeo de los ojos, tos, disnea y finalmente, la muerte.

El dióxido de nitrógeno es un oxidante que unido a la hemoglobina produce metahemoglobina y que en concentraciones altas causa bronquiolitis obliterante, fibrosis bronquiolar y enfisema.

En cuanto a los animales, al exponer ratas a altas a concentraciones de NO₂, entre 4 y 20 ppm, durante varios días, se demostró que éste les producía edema alveolar, aumento en la concentración de proteínas en el lavado pulmonar, daño en el epitelio de las vías aéreas, bronquiolitis y susceptibilidad a infecciones causadas por virus y bacterias. (7)

Estudios clínicos controlados con humanos indican que las personas con asma, representan el grupo más vulnerable a los efectos del dióxido de nitrógeno. Sin embargo, los resultados obtenidos de voluntarios son contradictorios e inciertos y pueden deberse a diferencias en los métodos de análisis, a estudios estadísticos insuficientes y a la susceptibilidad de cada individuo de acuerdo a sus variaciones genéticas.

También se observó que el impacto de dióxido de nitrógeno fue más fuerte en ciudades con climas calurosas, principalmente durante el verano.

3.2.3 Límites permitidos.

En México la norma oficial mexicana NOM-023-SSA1-1993 establece un límite máximo permisible de 0.210 ppm promedio horario, la cual no debe excederse más de una hora al año.

Comparativamente, en los Estados Unidos el estándar federal establece un valor de 0.053 ppm promedio anual. La Organización Mundial de la Salud recomienda un valor de 40 µg/m³ (0.021 ppm) para el promedio anual y de 200 µg/m³ (0.106 ppm) para el promedio de una hora.²⁵

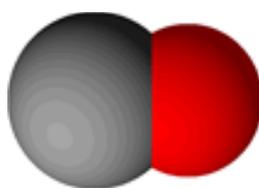
3.3 Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono se produce de la combustión parcial de los compuestos que contienen carbono, principalmente de los motores de combustión interna. En condiciones en donde la disponibilidad de oxígeno es insuficiente, el monóxido de carbono se forma preferentemente sobre el dióxido de carbono.

²⁵ <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/informaciontecnica/index.php?opcion=2&opcionmonitoreo=2>
consultada el 29 de julio 2010

El monóxido de carbono es un compuesto altamente tóxico, sin embargo juega un papel importante en la síntesis y producción de una gran cantidad de productos. El origen del CO es diverso, entre las fuentes naturales que lo producen se encuentran la quema de biomasa y la oxidación de compuestos orgánicos como el isopreno y el metano.

El mayor emisor de monóxido de carbono es emitido por los autos particulares con 40%, seguido por los vehículos de menos de 3 toneladas con el 21%, taxis con el 11%, microbuses con el 9%, vehículos mayores a tres toneladas y pick up con el 6% cada uno.²⁶



Representación tridimensional del Monóxido de Carbono

3.3.1 Evolución

De acuerdo con los datos del monitoreo atmosférico, desde 1991 la concentración de monóxido de carbono en el aire ambiente ha presentado una tendencia a la baja. La renovación del parque vehicular, la instalación de sistemas de inyección electrónica y la incorporación de los convertidores catalíticos en los vehículos que circulan en la Ciudad de México son las medidas que han impactado de manera significativa en la disminución de este contaminante.

En la Figura 3.3 se muestra la gráfica de tendencia del Monóxido de carbono según los datos reportados en la página del SIMAT.

²⁶ http://www.sma.df.gob.mx/simat/programas_ambientales/anexo/elementos_hnc.pdf consulta 30 de octubre 2010

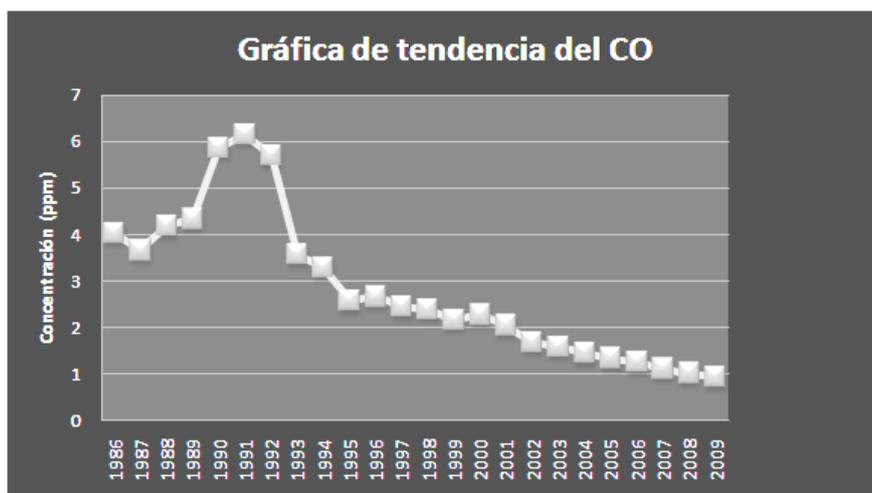


Figura 3.3

3.3.2 Efectos en la salud

Los efectos en la salud de la población es la intoxicación como uno de los tipos de envenenamiento más común en el mundo, tan sólo en los Estados Unidos alrededor de 40,000 personas al año requieren de atención médica. El monóxido de carbono es altamente tóxico para los seres humanos y otras formas de vida aeróbicas, inhalado en pequeñas cantidades puede producir hipoxia, daño neurológico y posiblemente la muerte y una característica peligrosa está relacionada a que carece de olor y sus síntomas pueden ser mareo y dolor de cabeza seguido de inconsciencia, falla respiratoria y muerte.

Una exposición prolongada al monóxido de carbono puede reducir la cantidad de oxígeno usado por el cerebro hasta el punto en que la víctima queda inconsciente y puede sufrir daño cerebral o muerte por hipoxia.

Las altas concentraciones de CO pueden existir en ciudades con mucho tráfico. Las personas que pasan los días en las calles (conductores de autobuses, camiones y patrullas, inspectores de vehículos, encargados de estacionamientos, peatones y ciclistas, trabajadores que reparan las calles y vendedores ambulantes) respiran más CO.

Los conductores de automóviles también están expuestos al CO proveniente de las emisiones de los escapes de los otros autos, y posiblemente de las emisiones de su

vehículo o del humo de cigarro. Cuando el automóvil está detenido, los niveles de CO dentro del vehículo pueden incrementar.

Individuos con enfermedades cardiovasculares o respiratorias, anemia o hemoglobina irregular pueden experimentar efectos de salud más severos o pueden padecer efectos a niveles de exposición más bajos en comparación con individuos menos susceptibles.

Los niños pueden ser más vulnerables debido a que sus pulmones no están completamente desarrollados, respiran más rápido y pasan más tiempo al aire libre. En individuos sanos la exposición a CO puede afectar la visión o la agilidad mental.

3.3.3 Límites permitidos.

En México la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993 establece un límite máximo permisible de 11.0 partes por millón (ppm) en un promedio móvil de 8 horas, lo cual no debe excederse más de una vez al año.

Comparativamente con Estados Unidos el estándar federal establece un valor de 9 ppm para 8 horas y de 35 ppm para el promedio de 1 hora.²⁷

3.4 Dióxido de azufre (SO₂)

El dióxido de azufre es emitido a la atmósfera por varias fuentes naturales. La actividad geotérmica libera grandes cantidades de dióxido de azufre, junto con pequeñas cantidades de trióxido de azufre, azufre elemental, sulfuro de hidrógeno y sulfatos en forma de partículas. Sin embargo, la mayor fuente natural es la oxidación del material orgánico que contiene azufre o la reducción del sulfuro de hidrógeno en condiciones anaerobias.

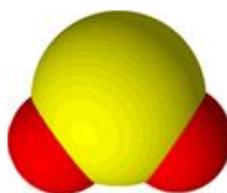
En ambientes urbanos el dióxido de azufre es generado por distintas fuentes antropogénicas. La principal proviene de la quema de combustibles sólidos como el

²⁷ <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/informaciontecnica/index.php?opcion=2&opcionmonitoreo=3>
Consultada el 29 de julio 2010

carbón vegetal o combustibles derivados del petróleo. Los procesos de refinación del petróleo, la producción de ácido sulfúrico y la fundición de minerales, particularmente de zinc, cobre y plomo lo producen.

El dióxido de azufre participa en la generación de lluvia ácida y en la formación de partículas, razón por la cual se dedican innumerables esfuerzos para reducir este contaminante del aire. Cuando el SO_2 entra en la atmósfera puede oxidarse y formar trióxido de azufre (SO_3) en presencia del radical hidroxilo OH. El SO_3 se disuelve en agua para formar ácido sulfúrico (H_2SO_4).

La principal fuente de emisión de dióxido de azufre, son las fuentes puntuales y las fuentes móviles, estas generan más del 70% y el 29% respectivamente. Dentro de las fuentes móviles, la categoría que más contribuyen son los autos particulares.



Representación
tridimensional del
Dióxido de Azufre

3.4.1 Evolución

De acuerdo con los datos del monitoreo atmosférico, desde 1992 la concentración de dióxido de azufre en el aire ambiente ha presentado una tendencia a la baja. La medida que ha provocado un mayor impacto en la concentración de este contaminante es la reducción gradual del contenido de azufre en los combustibles empleados en el Valle de México, tanto para la industria como para los vehículos.

En la Figura 3.4 se muestra la gráfica de tendencia del Dióxido de azufre según los datos reportados en la página del SIMAT.

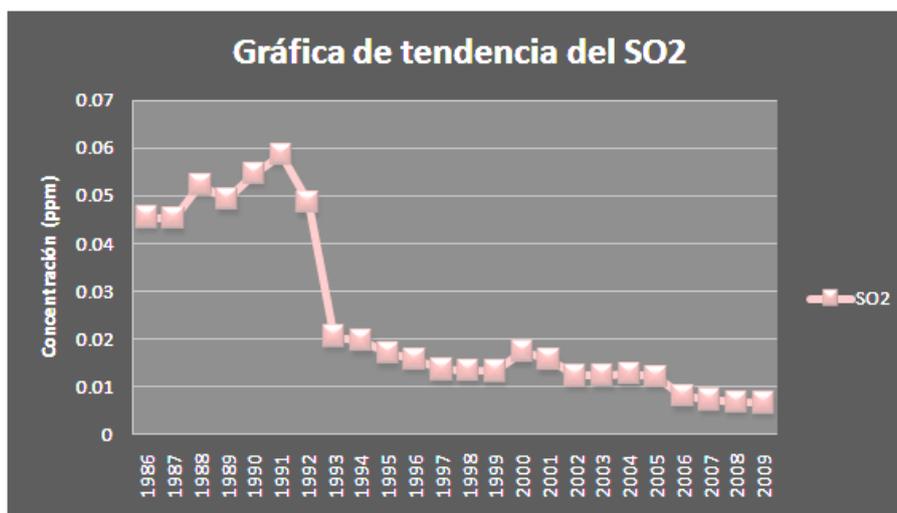


Figura 3.4

3.4.2 Efectos en la salud

En altas concentraciones el dióxido de azufre puede ocasionar dificultad para respirar, humedad excesiva en las mucosas de las conjuntivas, irritación severa en vías respiratorias y al interior de los pulmones por formación de partículas de ácido sulfúrico, ocasionando vulnerabilidad en las defensas.

El dióxido de azufre es causante de enfermedades respiratorias como broncoconstricción, bronquitis y traqueítis, pudiendo llegar a causar broncoespasmos en personas sensibles como los asmáticos, agravamiento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares existentes, incluso la muerte. Si bien los efectos señalados dependen en gran medida de la sensibilidad de cada individuo, los grupos de población vulnerables al dióxido de azufre son los niños y adultos mayores, principalmente los asmáticos y a aquellos con enfermedades pulmonares crónicas como bronquitis y enfisema.

La combinación de óxidos de azufre y partículas suspendidas actúan sinérgicamente produciendo un efecto combinado mucho más nocivo que el efecto individual. Experimentos realizados en animales expuestos a concentraciones de SO₂ de 9 a 50 partes por millón (ppm), muestran cambios morfológicos y funcionales permanentes similares a los que se presentan con bronquitis crónica.

3.4.3 Límites permitidos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda como límite para preservar la salud pública una concentración de 100 a 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas y de 40 a 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en una media aritmética anual. La Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-1993 de dióxido de azufre establece como límite de protección a la salud, una concentración de 0.13 ppm (ó 341 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) promedio de 24 horas, una vez al año y 0.03 ppm (ó 79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en una media aritmética anual para proteger a la población susceptible.²⁸

3.5 Partículas

3.5.1 Origen

En contaminación atmosférica se reconoce como partícula a cualquier material sólido o líquido con un diámetro que oscila entre 0.0002 y 500 micrómetros (μm). En conjunto se designan como partículas suspendidas totales (PST).

Las fuentes de emisión de partículas pueden ser naturales o antropogénicas. Entre las fuentes naturales se encuentran: erosión del suelo, material biológico fraccionado, erupciones volcánicas, incendios forestales, entre otras. Las fuentes antropogénicas más comunes son las que se producen en la combustión de productos derivados del petróleo, por la quema en campos agrícolas o en diversos procesos industriales.



Figura 3.5

²⁸ <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/informaciontecnica/index.php?opcion=2&opcionmonitoreo=4>

Consultada el 29 de julio 2010

En la Ciudad de México las principales fuentes antropogénicas están vinculadas con los procesos de combustión interna de vehículos automotores, la industria de la construcción, la formación fotoquímica de aerosoles con contenido de nitrato y sulfato; y durante la época de estiaje la fuente principal de partículas son las tolvaneras.

Las partículas pueden tener una composición fisicoquímica homogénea o estar constituidas por diversos compuestos orgánicos e inorgánicos. Entre los componentes orgánicos se encuentran: fenoles, ácidos, alcoholes y material biológico (polen, protozoarios, bacterias, virus, hongos, esporas y algas). Entre los compuestos inorgánicos se encuentran nitratos, sulfatos, polímeros, silicatos, metales pesados (fierro, plomo, manganeso, zinc o vanadio) y elementos derivados de pesticidas y plaguicidas.

3.5.2 Clasificación

Las partículas se clasifican de diferentes maneras: por su efecto en la salud humana, como producto derivado de un proceso natural o antropogénico y por sus características físicas.

Partículas sedimentables (> 10 μm). Son partículas que por su peso tienden a precipitarse con facilidad, razón por lo cual permanecen suspendidas en el aire en períodos cortos de tiempo. Por lo general no representan riesgos significativos a la salud humana.

Partículas menores a 10 micrómetros PM_{10} ($\leq 10 \mu\text{m}$). Son partículas de diámetro aerodinámico equivalente o menor a 10 μm . Se consideran perjudiciales para la salud debido a que no son retenidas por el sistema de limpieza natural del tracto respiratorio. Haciendo un análisis de la contribución de los diferentes sectores en la generación de partículas PM_{10} , se ve que este contaminante es emitido en mayor proporción por las fuentes móviles, destacando las emisiones de los vehículos a diesel, ya que los tractocamiones y autobuses emiten el 29%; de los vehículos a gasolina destacan las emisiones de los autos particulares con el 9%.

Partículas menores a 2.5 micrómetros $PM_{2.5}$ ($\leq 2.5 \mu m$). Son partículas de diámetro aerodinámico equivalente o menor a $2.5 \mu m$. Representan un mayor riesgo para la salud humana, puede ser un factor de muerte prematura en la población.

En la actualidad aún se presentan concentraciones de partículas suspendidas totales que rebasan los límites permisibles, no obstante, es evidente el decremento registrado de este contaminante en los últimos años.

3.5.3 Evolución

Las partículas menores a 10 micrómetros, el año 2007 registra las concentraciones más bajas registradas de los últimos años.

Las partículas menores a 2.5 micrómetros, registradas desde el año 2004 se encuentran, aún, por encima de los valores seguros para proteger a la población.

En las Figuras 3.6 y 3.7 se muestran las gráficas de las tendencias de las PM_{10} y $PM_{2.5}$ según datos reportados por el SIMAT.

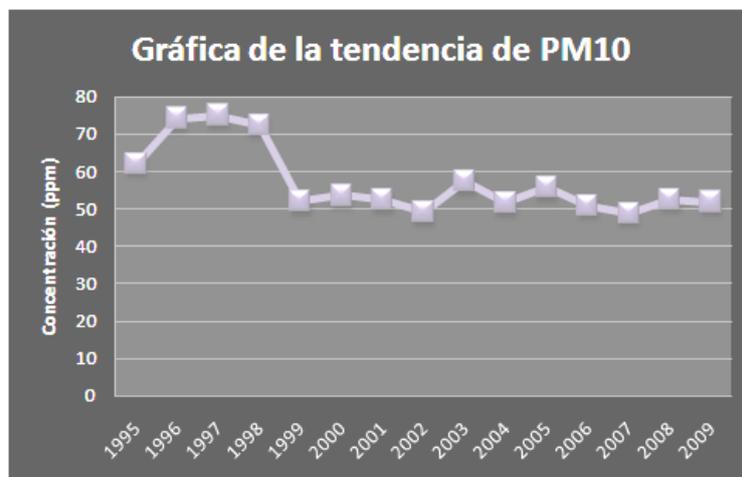
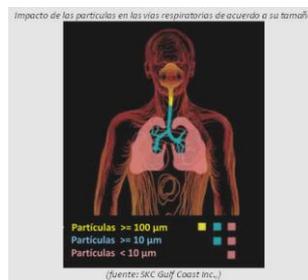


Figura 3.6

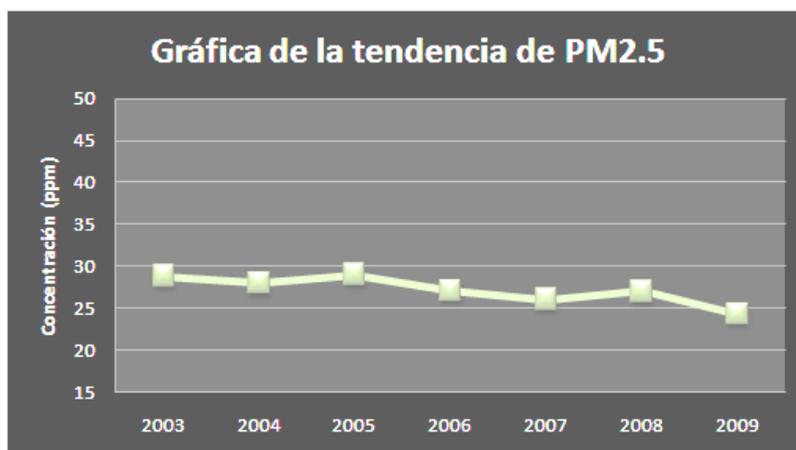


Figura 3.7

3.5.4 Efectos en la salud

El riesgo a la salud por partículas lo constituyen su concentración en el aire y el tiempo de exposición; sin embargo, el tamaño es la característica física más importante para determinar su toxicidad y efectos en la salud humana.

Las partículas mayores a 10 micrómetros son retenidas básicamente en las vías respiratorias superiores y eliminadas en su mayor parte por el sistema de limpieza natural del tracto respiratorio, por lo que no son consideradas significativamente dañinas para la salud, sin embargo la exposición continua a altas concentraciones puede causar irritación de garganta y mucosas.

Por su parte, las partículas menores a 10 micrómetros (fracción respirable) no son retenidas en las vías respiratorias superiores, cerca de un tercio penetra hasta los pulmones. Su efecto va a depender de su composición química, pero pueden producir irritación de las vías respiratorias, agravar el asma y favorecer las enfermedades cardiovasculares. Se relacionan con la enfermedad de los pulmones negros en mineros, silicosis y asbestosis.

En el corto plazo la contaminación por este tipo de partículas, puede causar el deterioro de la función respiratoria. En el largo plazo se asocia con el desarrollo de enfermedades crónicas, el cáncer o la muerte prematura. De acuerdo con estudios realizados en México, se estima que el riesgo de morir prematuramente se incrementa en 2% por cada

incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} . La combinación de partículas suspendidas y óxidos de azufre tienen un efecto en la salud sinérgico.

Los grupos de la población con mayor susceptibilidad a los efectos de las partículas son:

- Niños
- Adultos mayores
- Personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares previas
- Fumadores
- Personas que respiran por la boca

El riesgo asociado con las partículas que se depositan en pulmones es mayor en comparación con el depósito en garganta. Los estudios recientes demuestran que las $\text{PM}_{2.5}$ tienen la capacidad de ingresar al espacio alveolar o al torrente sanguíneo, incrementando el riesgo de padecer enfermedades crónicas cardiovasculares y muerte prematura.

3.5.5 Límites permitidos

La Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993 de (a)PST, (b) PM_{10} y (c) $\text{PM}_{2.5}$ establece como límites de protección a la salud:

- (a) Una concentración de $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas.
- (b) Una concentración de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ media aritmética anual para proteger a la población susceptible. Dado los efectos de este tipo de partículas en la salud, son motivo de amplias discusiones para reformular las normas, debido a que en concentraciones bajas (30 a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) hay un incremento en la demanda de atención médica por padecimientos crónicos respiratorios y aumento de muertes prematuras [3].
- (c) Una concentración de $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas y $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ media aritmética anual para proteger a la población susceptible.²⁹

²⁹ <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/informaciontecnica/index.php?opcion=2&opcionmonitoreo=5>
Consultada el 29 de julio 2010

Resumen y conclusiones

En la actualidad el ozono presenta un decremento en sus concentraciones máximas respecto a normas vigentes, aunque hay riesgos a su exposición afectando principalmente el tracto respiratorio.

Respecto al dióxido de nitrógeno se ha comprobado una tendencia decreciente en la concentración de este contaminante, sin embargo, la tendencia no es regular, debido a que depende de sus fuentes de emisión. El dióxido de nitrógeno está fuertemente relacionado a partículas finas porque proviene de las mismas fuentes de combustión. Hay que poner especial atención a este contaminante.

El monóxido de carbono es altamente tóxico para los seres humanos y otras formas de vida aeróbicas, inhalado en pequeñas cantidades puede producir hipoxia, daño neurológico y posiblemente la muerte. Las altas concentraciones de CO pueden existir en ciudades con mucho tráfico. De acuerdo a los datos del SIMAT, la concentración de este contaminante ha presentado tendencia a la baja. La renovación del parque vehicular, incorporación de convertidores catalíticos, son las medidas que han impactado en la disminución de este contaminante.

La concentración de dióxido de azufre en el aire ha presentado una tendencia a la baja, debido a la reducción gradual del contenido de azufre en los combustibles empleados en el Valle de México, tanto para la industria como para los vehículos. El dióxido de azufre es causante de enfermedades respiratorias.

En la actualidad las partículas aún muestran concentraciones que rebasan los límites permisibles, lo cual es peligroso para la población. Hay un incremento en la demanda de atención médica por padecimientos crónicos respiratorios y aumento de muertes prematuras, por lo que será importante poner especial atención a este contaminante.

Capítulo 4

Contramedidas del GDF para la reducción de emisiones contaminantes al ambiente.

Introducción

Con el propósito de reducir las emisiones a la atmosfera de gases contaminantes, monitoreadas a través del IMECA, el Gobierno del Distrito Federal (GDF) coordinó la implementación de diversas contramedidas, éstas son: el cierre de la refinería de PEMEX de Azcapotzalco (por acuerdo del C. Presidente de la República), la eliminación de combustóleo por gas natural en la central termoeléctrica del Valle de México y el Programa “Hoy No circula”, en este capítulo se hablará de estos tres acontecimientos importantes que ayudaron a mejorar la calidad del aire que respiramos.

4.1 Refinería de PEMEX en Azcapotzalco

En 1933, la compañía petrolera "El Águila" puso en operación una refinería en Azcapotzalco con una capacidad de refinación de siete mil 500 barriles diarios.

Después de la expropiación petrolera y luego de realizar trabajos para incrementar la capacidad de refinación a 50 mil barriles diarios, Petróleos Mexicanos inauguró, el 20 de noviembre de 1946, la refinería "18 de Marzo".

En 1976 se amplió la capacidad de proceso de la Refinería a 105 mil barriles diarios.

La refinería llegó a contar con 14 plantas de refinación, 3 unidades petroquímicas, 218 tanques de almacenamiento y terminales de embarques y reparto. Abastecía de productos finales a la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

La refinería enviaba sus productos finales a las cuatro Terminales ubicadas en la ZMVM.

Instalaciones durante la operación de la refinería:

- 14 plantas de refinación
- 3 plantas petroquímicas
- 218 tanques de almacenamiento
- Servicios auxiliares
- Terminal de embarques y reparto
- Terminal de lubricantes
- Talleres y almacenes
- Edificios administrativos
- Colonia de empleados

A continuación en la Figura 4.1 se muestra la Refinería 18 de marzo.



Figura 4.1 REFINERÍA 18 DE MARZO

www.pemex.com/index.cfm?action=content&io...

consultado en noviembre 2010

Los casi 60 años de operación de la refinería ocasionaron afectaciones por hidrocarburos en el suelo y subsuelo.

Por instrucciones presidenciales, el 18 de marzo de 1991 la refinería cerró sus operaciones y en una parte de los terrenos se construyó una moderna Terminal de Almacenamiento y Reparto.

Entre 1991 y 2007, Pemex Refinación realizó acciones relativas al desmantelamiento de la ex refinería entre las que destacaron: recuperación de hidrocarburos en fase libre, reubicación de plantas de proceso, etc. Pemex solicitó la realización de diversos estudios de diagnóstico con el propósito de determinar las acciones a seguir en los terrenos de la ex refinería.³⁰

La vieja refinería de Pemex se ha convertido en un parque público para el esparcimiento de la población desde el año de 2010.

4.2 Central Termoeléctrica del Valle de México

La Central Termoeléctrica del Valle de México se ubica en el municipio de Acolman en el Estado de México, está compuesta por tres unidades generadoras de energía eléctrica con una capacidad de 150 MW c/u y una unidad de 300 MW.

En la actualidad dicha central opera empleando *100% gas natural*, aunque cuenta con los equipos necesarios para quemar una mezcla gas natural – combustóleo. En dicha central se han llevado a cabo esfuerzos importantes para disminuir las emisiones a la atmósfera a niveles que marca la NOM-085-ECOL/94, sin embargo dadas las condiciones de diseño de la unidad 4 (300MW) y pese a haber logrado abatir sus emisiones de NOx a 170 ppm referidos a 5% de O2 y 1 atm (106 g/s), aun se encuentra emitiendo por encima de lo que indica la normativa mencionada. Dado que la unidad 4 tiene 27 años operando, su generador de vapor ha alcanzado el término de su vida útil, por lo que no es rentable el incluir dispositivos de control de emisiones.

Actualmente, en la región centro de México, se mantiene un incremento constante en la demanda de energía eléctrica, por lo que sacar de operación dicha unidad, disminuiría significativamente los márgenes de reserva de energía eléctrica en la región, más aun, se requirió abastecer a la región con 2204 MW adicionales para el año 2008.

³⁰ Información de la refinería de PEMEX consultada en la página: <http://www.pemex.com/index.cfm?action=content§ionID=122&catID=11642> el día 4 de noviembre 2010

Existe en el mercado un proceso de generación de energía eléctrica más eficiente que un generador de vapor convencional, el cual no requiere mayor consumo de agua y sus emisiones a la atmósfera resultan significativamente inferiores. En el caso de la Central Termoeléctrica del Valle de México existe la posibilidad de implantar esa tecnología y de aprovechar gran parte de la infraestructura existente, lo que traerá además de beneficios económicos, beneficios ambientales al no requerirse la construcción de una central termoeléctrica adicional.³¹

A continuación en la Figura 4.2 se muestra una ilustración de la Central Termoeléctrica del Valle de México:



Figura 4.2

www.protarsa.com/termoelectrica.htm
consultado noviembre 2010

4.3 Programa “Hoy no circula”

4.3.1 Antecedentes del programa

A mediados de los ochenta surge como una iniciativa ciudadana “Un Día Sin Auto”, la cual era de carácter voluntario.

³¹ <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/viii-006.pdf> consultado 9 de noviembre 2010

En 1989, inicia la aplicación obligatoria del Programa Hoy No Circula (HNC) en la ZMVM (Zona Metropolitana del Valle de México), originalmente temporal para el período invernal; pero en 1990, se establece que el Programa tendrá una vigencia permanente.

En 1992, inició un esquema de exención de la restricción de circulación de unidades que utilizaban gas licuado de petróleo o gas natural comprimido en lugar de gasolina o diesel.

Esta acción fue motivada por la importante reducción de contaminantes que los combustibles gaseosos propician.

En 1997, se establece la exención al HNC de los vehículos a gasolina de bajo nivel de emisiones contaminantes, por lo que las unidades 1993 y posteriores que utilizaban convertidor catalítico de tres vías en circuito cerrado fueron beneficiados con este esquema identificándolos con el holograma “0”.

Finalmente, en 1999 se incentivó la introducción al mercado mexicano de vehículos que cumplieran con los niveles de emisión de estrictas normas internacionales, por lo que además de exentarlos del HNC, también se les permitió no verificar durante sus primeros dos años de uso, identificándolos con el holograma “doble 0”.

El objetivo inicial del programa Hoy No Circula, fue disminuir los niveles de emisión de contaminantes, a través de la restricción diaria de la circulación del 20% del parque vehicular matriculado en la Zona Metropolitana del Valle de México. Esta situación, permitió reducir el consumo de 11 mil 500 barriles diarios de combustible y la emisión de 30 mil toneladas anuales de contaminantes.

Actualmente, pueden exentar el HNC los vehículos de uso particular a gasolina cuyo año modelo es 1993 y posterior, las unidades de cualquier tipo que usen gas para su carburación, los vehículos a diesel 1998 y posteriores, así como las unidades de emergencia.

Inventario de emisiones

De acuerdo con el más reciente inventario de emisiones del año 2004, las fuentes móviles contribuyen con el 82% de las emisiones totales generadas en las ZMVM.

El sector transporte sigue emitiendo importantes aportaciones de casi todos los contaminantes: genera el 99% del monóxido de carbono (CO), el 81% de los óxidos de nitrógeno (NOx), el 46% de los compuestos orgánicos volátiles (COV), el 51% de las partículas menores a 10µm (PM10) y el 30% del bióxido de azufre (SO2). También se puede apreciar que las fuentes puntuales industriales contribuyen en forma importante a las emisiones de PM10, SO2, NOX y COV reactivos.

Contingencias ambientales atmosféricas

En la ZMVM desde 1990, se instituyó el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas para disminuir la generación de contaminantes en días donde se alcanzan niveles del IMECA elevados y que además existen condiciones desfavorables para la dispersión de los mismos.

Desde el año 1990 hasta el 28 de mayo de 1998, la aplicación de la fase I del programa de contingencia se daba cuando el índice del IMECA era superior a los 250 puntos y la fase II se aplicaba cuando se alcanzaban niveles superiores a los 350 puntos. A partir del 29 de mayo de 1998 los niveles de aplicación cambiaron el número de precontingencias, y así tenemos la disminución de 217 que se registraron en el año 1991 a 2 que se presentaron en 2003; por lo que se refiere a las contingencias en fase I por ozono, en 1993 se registraron 13 y en los últimos cuatro años sólo se ha presentado 1, en el año 2002; por PM10 se presentó una contingencia en el año 2003.

Normatividad ambiental para las fuentes móviles

Para la regulación ambiental de los vehículos se encuentran vigentes las Normas Oficiales Mexicanas NOM-042-ECOL-1999, NOM-041-ECOL-1999, , NOM-044-ECOL-1993, NOM-045-ECOL-1996, NOM-047-ECOL-1998, NOM-077-ECOL-1993,

y NOM-086-ECOL-1994 la primera fija los niveles máximos permisibles de emisión que deberán cumplir los vehículos nuevos en planta; la segunda y la tercera establecen los niveles máximos permisibles de emisión que deberán cumplir los vehículos en circulación que consumen gasolina o gases; la cuarta establece los niveles máximos de opacidad que deberán cumplir los vehículos que consuman diesel como combustible; la quinta y sexta establecen los procedimientos que se deberán seguir para realizar la verificación vehicular en unidades a gasolina y a diesel y la última es la norma que establece la calidad ecológica de los combustibles a través de las características fisicoquímicas que deberán tener los combustibles que se distribuyen en el país y en especial en la ZMVM.

4.3.2 Situación actual

Desde su inicio el programa Hoy No Circula ha presentado una gran cantidad de modificaciones, mismas que en su mayoría, se han realizado para utilizar al programa como una herramienta de gestión para incentivar acciones o medidas asociadas a la prevención y control de la contaminación del aire en el Valle de México.

Estas actualizaciones han propiciado reducciones efectivas en las emisiones de las fuentes móviles que se han incorporado a dichos programas, ya sea de forma voluntaria u obligatoria. Sin embargo, al mismo tiempo que se han obtenido beneficios ambientales, también ha disminuido año con año el número de vehículos a los cuales les aplica la restricción a la circulación, llegando a un punto en donde se deben tomar medidas para evitar que el programa HNC pierda su cobertura y utilidad.³²



Figura 4.3
itca8.362000.info/no-circula.html
consultado noviembre 2010

³² http://www.sma.df.gob.mx/simat/programas_ambientales/anexo/elementos_hnc.pdf consultada el 20 de octubre de 2010

Resumen y conclusiones

Las tres medidas antes mencionadas; el cierre de la refinería de Azcapotzalco, el uso de gas natural de la Central Termoeléctrica del Valle de México y la implementación del Programa “Hoy no circula” han favorecido en gran medida a la disminución de algunos componentes del IMECA tales como el CO, SO₂. También las nuevas normas existentes para los vehículos y para el sector industrial son acciones asociadas a la prevención y control de la contaminación del aire.

El rescate de parte del predio que ocupa la ex Refinería 18 de Marzo incluye el proyecto de construir el primer Acuario Nacional que albergará especies de agua dulce y salada que lo ubicaría en uno de los más grandes del mundo.

El espacio será transformado en un parque público en beneficio de la población de la Ciudad de México y un atractivo para el turismo nacional e internacional.

También representará un nuevo pulmón el norponiente de la Ciudad de México, lo que aumentará el número de metros cuadrados de áreas verdes por habitantes.

La Central Termoeléctrica Valle de México se ubica en el municipio de Acolman en el Estado de México, está compuesta por tres unidades generadores de energía eléctrica con una capacidad de 150 MW c/u y una unidad de 300 MW. En la actualidad dicha central opera empleando 100% gas natural, cuenta con los equipos necesarios para quemar una mezcla gas natural – combustóleo. En dicha central se han llevado a cabo esfuerzos importantes para disminuir las emisiones a la atmósfera a niveles que marca la NOM-085-ECOL/94.

Existe en el mercado un proceso de generación de energía eléctrica más eficiente que un generador de vapor convencional, el cual no requiere mayor consumo de agua y sus emisiones a la atmósfera resultan significativamente inferiores. En el caso de la Central Termoeléctrica del Valle de México existe la posibilidad de implantar esa tecnología y de aprovechar gran parte de la infraestructura existente, lo que traerá además de beneficios económicos, beneficios ambientales al no requerirse la construcción de una central termoeléctrica adicional.

El Programa Hoy No Circula actual, tiene como objetivo restringir la circulación de los vehículos automotores en el Distrito Federal un día a la semana y en contingencia ambiental. Dicha restricción, se realiza con base en la terminación de la placa vehicular.

Para evaluar el beneficio del programa se observa el comportamiento de la concentración de monóxido de carbono en el aire de la ZMVM, toda vez que este gas es un indicador de la actividad vehicular en la misma.

La tendencia en los niveles de monóxido de carbono, a partir de 1987, iba en incremento, tendencia que en 1990 con la incorporación del Hoy No Circula se frena, manteniéndose los niveles estables durante tres años a pesar del crecimiento del parque vehicular.

Un beneficio cuantificable de forma directa del programa, es el cumplimiento anticipado de las normas de emisión 2001 durante 1999 y el 2000.

Asimismo, el programa de verificación vehicular en la ZMVM que tiene por objetivo el inducir la aplicación de mantenimiento preventivo vehicular y, en su caso, obligar el mantenimiento correctivo de las unidades que han sido detectadas con altos niveles de emisiones contaminantes, ha sido de vital importancia para la administración del programa Hoy No Circula, ya que a través de él se otorgan los estímulos, con base en sus emisiones y edad, que permiten identificar a las unidades que pueden circular todos los días dado el cumplimiento de los requisitos para exentar el programa Hoy No Circula.

Para finalizar, el GDF trabajará en la actualización del programa para hacerlo más seguro, confiable y preciso de forma tal que estas modificaciones, sumadas a la actualización de las normas de verificación vehicular, permitan operar el programa Hoy No Circula considerando únicamente criterios de emisiones contaminantes y no por edad de los vehículos.

Capítulo 5 Series de tiempo

Introducción

El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), como se mencionó anteriormente, pone a disposición del público en general el acceso a la información de la base de datos histórica de los subsistemas del SIMAT.

Podemos encontrar información de contaminantes atmosféricos, parámetros meteorológicos y parámetros fisicoquímicos. En cada subsistema se aplica una serie de criterios de validación para el control de calidad de los datos, que se van actualizando dependiendo de la modernización de las técnicas y métodos de determinación para contaminantes atmosféricos, parámetros meteorológicos y parámetros fisicoquímicos.

Las bases de datos anuales de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) contienen información de las concentraciones de contaminantes del IMECA que se registran cada hora desde 1986.

Para el análisis de estos datos reportados, la alternativa son los métodos de análisis de series de tiempo, ya que se refieren a datos registrados secuencialmente en el tiempo.

Este tipo de análisis estadístico será el procedimiento a emplear, y en el capítulo, se hará un breve resumen de la teoría relacionada con el análisis de las series de tiempo.

En el desarrollo del presente capítulo se definirá el concepto de series de tiempo, hablaremos de las alternativas para hacer análisis descriptivo de las series de tiempo, de los modelos estadísticos asociados con estas y de los procedimientos tanto para ajustar modelos a series observadas como para hacer pronósticos a futuro. Describiremos la función de auto-correlación y la función de auto-correlación parcial así como las ventajas que representan dentro del análisis de las series temporales. También se hará una breve descripción de las técnicas de suavizamiento, tales como promedios móviles y suavizamiento exponencial que igualmente pueden ser utilizadas para la elaboración de pronósticos.

Se hablará de los modelos de Box y Jenkins para series de tiempo, los auto-regresivos (AR), modelos de promedios móviles (MA), modelos mixtos (ARMA) y modelos mixtos integrados (ARIMA).

5.1 Técnicas descriptivas en series de tiempo

Una serie de tiempo es una colección de observaciones tomadas secuencialmente en el tiempo. Surgen en diversas áreas, como la economía, física, demografía, etc.

En la figura 5.1 se muestra la gráfica de una serie de tiempo que reporta el número de usuarios conectados a internet en un servidor particular cada minuto durante 100 minutos.

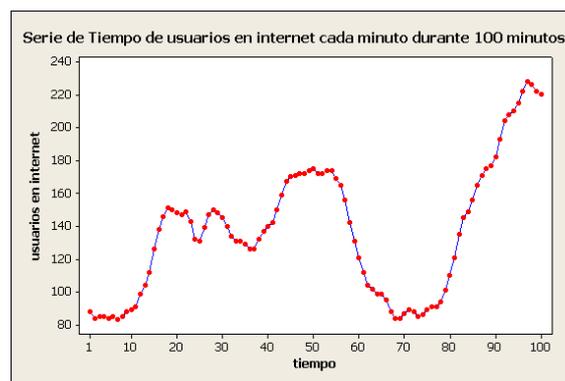


Figura 5.1

Los objetivos del Análisis de Series de Tiempo son:

- Descripción: El primer paso en el análisis es, generalmente, graficar la serie para obtener descripciones simples de las principales propiedades.
- Explicación: Cuando se toman datos en dos o más variables, es posible, usar la variación en una serie para explicar la variación en otra serie, esto puede ayudar en la comprensión del mecanismo que genera la serie.
- Predicción: Dada una serie de tiempo observada, el objetivo puede ser, predecir valores futuros de la serie.
- Control: Cuando la serie tiene asociada una medida de calidad de un proceso de manufactura, el objetivo del análisis puede ser controlar el proceso.

En una serie de tiempo, a diferencia de otras áreas de la estadística clásica, es importante que las observaciones sean dependientes, pues es a partir de este supuesto que intentamos predecir los valores futuros por medio de observaciones pasadas. Si los valores observados en el tiempo son independientes, los métodos que describiremos más adelante no aplicarían.

5.1.1 Tipos de Variación

Los métodos tradicionales de análisis descriptivo, principalmente se relacionan con elementos de la serie tales como: tendencia, efecto estacional y fluctuaciones irregulares.

- Tendencia. Se define como el comportamiento “a largo plazo” de la media. Para hablar de tendencia, se debe tomar en cuenta el número de observaciones disponibles, y hacer un juicio subjetivo sobre el significado de “largo plazo”.

En la Figura 5.2 se muestra un ejemplo de una serie de tiempo con tendencia, que en este caso es ascendente, se graficó el índice de actividad económica a lo largo de 78 meses.

La línea azul nos muestra como la media va aumentando conforme el tiempo transcurre. No se perciben cambios en la varianza.

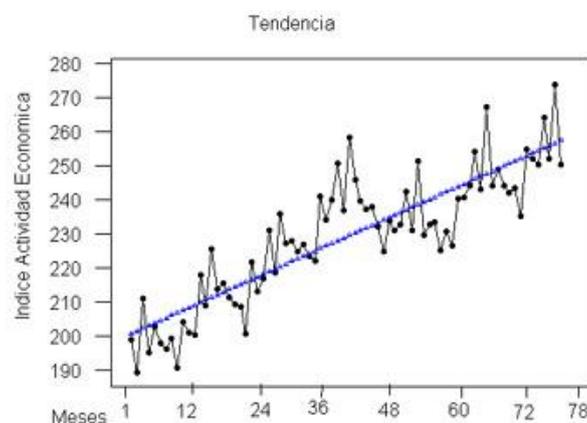


Figura 5.2

<http://www.ciberconta.unizar.es/LECCION/seriest/100.HTM>
consultado 15 de noviembre 2010

- Efecto Estacional. Es aquel que se repite en periodos regulares de tiempo.

La Figura 5.3 nos muestra el ejemplo de una serie de tiempo con efecto estacional. La serie tiene repeticiones en periodos regulares, los datos son mensuales y tienen repetición de ciclo anual (cada 12 meses). El periodo asociado a un efecto estacional debe ser claramente reconocible.

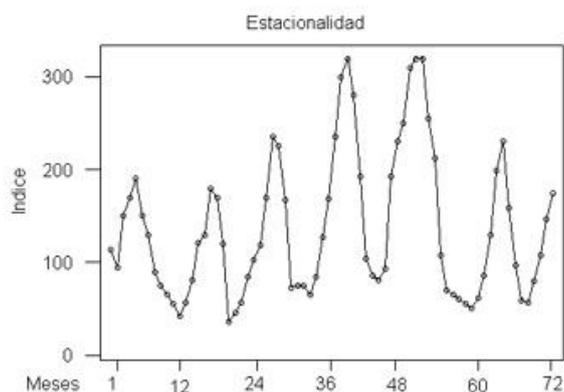


Figura 5.3

<http://www.ciberconta.unizar.es/LECCION/seriest/100.HTM>
consultado 15 noviembre 2010

- Fluctuaciones Irregulares. Se refieren a cambios repentinos o comportamientos atípicos en una serie de tiempo. Es importante examinar si presenta variaciones irregulares (valores atípicos).

En la Figura 5.4 observamos una serie con comportamientos atípicos, se pueden presentar una sola vez en el tiempo o varias veces, como es el caso.

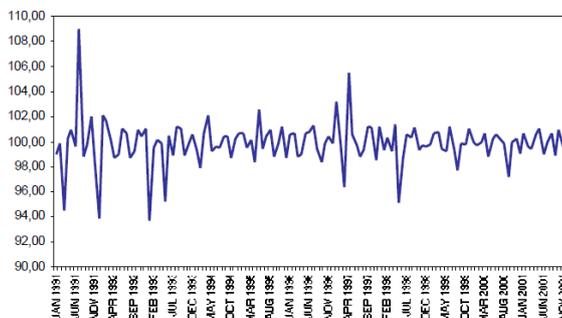


Figura 5.4

<http://www1.inei.gob.pe/biblioineipub/bancopub/Est/Lib0514/Libro.pdf>
consultado 15 de noviembre 2010

5.1.2 Series de Tiempo Estacionarias

Una serie de tiempo se dice es estacionaria, si no presenta cambios sistemáticos en la media (no tendencia), ni cambios sistemáticos en la varianza y si, estrictamente, no presenta variaciones periódicas (efecto estacional).

La mayoría de la teoría probabilística sobre series de tiempo se relaciona con series estacionarias, por esta razón, las series no estacionarias se transforman en series estacionarias, esto es, se eliminan tanto tendencias como ciclos estacionales de las series de tiempo originales, si presentaran estos comportamientos.

La Figura 5.5 y 5.6 muestran una serie con tendencia estacionaria y no estacionaria, respectivamente:

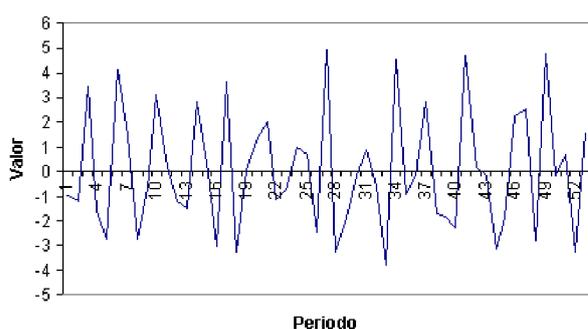


Figura 5.5

<http://matematicas.reduaz.mx/home/Docentes/ltrueba/Series/admon4.htm>

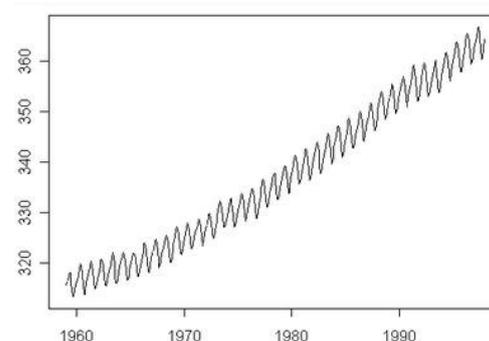


Figura 5.6

<http://www.seh-lilha.org/tseries.htm>

5.1.3 Gráfica de una Serie de Tiempo.

El primer paso en el análisis de una serie de tiempo es graficar las observaciones en el tiempo (Figura 5.1). Esto debe mostrar si la serie presenta tendencia, comportamientos estacionales, discontinuidades o valores atípicos. Elegir adecuadamente la escala y la manera de dibujar los puntos puede afectar significativamente la apariencia del gráfico.

Como se dijo anteriormente, la mayoría de los modelos asumen que no hay ni tendencia, ni ciclos estacionales, si los hay, se busca la manera de eliminarlos.

Las alternativas son transformaciones, esto significa convertir la serie original de valores $\{x_t\}$, en otra serie $\{y_t\}$. El propósito es que la serie $\{y_t\}$ no presente ni tendencia ni ciclos estacionales. Las transformaciones más comunes son:

- ✓ Primera diferencia: $y_t = x_t - x_{t-1}$
- ✓ Segunda diferencia: $y_t = (x_t - x_{t-1}) - (x_{t-1} - x_{t-2})$
- ✓ Diferencia con retraso k: $y_t = x_t - x_{t-k}$

Para eliminar tendencia de una serie se utilizan diferencias, generalmente, basta una primera o segunda diferencia.

Una serie estacional con ciclo de periodo k, regularmente se transforma en una serie no estacional aplicando diferencia con retraso (lag) k.

5.2 Función de auto-correlación y función de auto-correlación parcial: FAC y FACP

Un instrumento útil en el análisis de series de tiempo es la función de auto-correlación (FAC). En una serie de tiempo X_1, X_2, \dots, X_n , si los valores registrados en el tiempo tienen alguna relación entre ellos, se puede pensar en aplicar procedimientos específicos del análisis de series de tiempo para pronosticar valores futuros de la serie. Si no existiera correlación entre los valores de la serie, entonces estaríamos hablando de una serie de valores independientes, para los cuales, el método de inferencia estadística, es diferente.

Para determinar si nuestra serie cumple con esta condición definimos la llamada función de auto-correlación. La FAC, como veremos más adelante, puede ayudarnos también a detectar aspectos de una serie tales como la estacionariedad o la estacionalidad. Existe también la función de auto-correlación parcial (FACP), la cual es particularmente útil para determinar el orden de los llamados modelos auto-regresivos, como revisaremos más adelante.

5.2.1 Función de auto-correlación (FAC)

La función de auto-correlación de la serie de tiempo x_1, x_2, \dots, x_N con retraso (lag) k está dada por:

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2} \quad (1)$$

Podemos notar, que esta función calcula la correlación de Pearson entre x_t y x_{t+k} , entonces esta función calcula correlaciones de valores en la serie con valores de la serie misma. Así pues, r_1 es correlación de Pearson entre un elemento de la serie y el que le sigue inmediatamente después, r_2 es la correlación de Pearson entre un elemento y el que sigue dos unidades de tiempo después, y así, sucesivamente.

Correlograma

Un correlograma es una gráfica de r_k contra k .

La inspección visual del correlograma es útil, pues nos permite observar que tanta correlación existe entre los elementos de la serie. Los aspectos principales a considerar son:

1. Serie Aleatoria. Si la serie de tiempo es completamente al azar, (hay independencia en los valores observados) entonces, r_k es igual a cero para todos los valores de k .

En la Figura 5.7 se muestra el correlograma de una serie aleatoria, en esta podemos observar que ninguna correlación es significativamente distinta de cero.

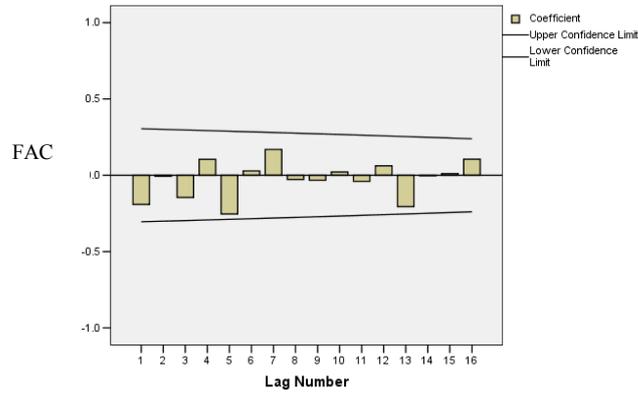


Figura 5.7

2. Correlación a corto plazo. Una serie estacionaria frecuentemente exhibe correlación a corto plazo, que se caracteriza por un valor alto de r_1 seguida de dos o tres coeficientes significativamente mayores a cero y luego los valores de r_k tienen valores cercanos a cero.

En la Figura 5.8 se muestra el correlograma de una serie estacionaria, en esta sólo una (o una cuantas) correlación (es) es (son) significativamente distinta(s) a cero.

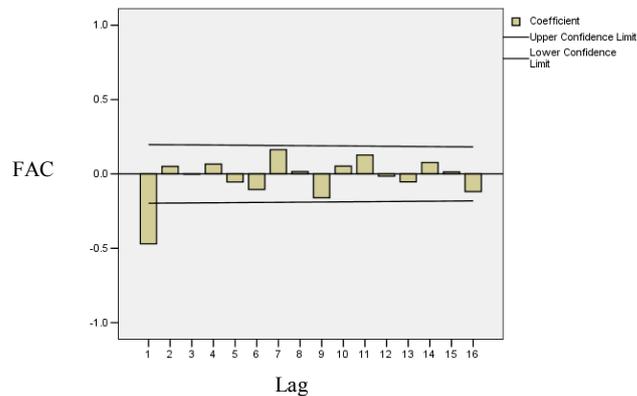


Figura 5.8

3. Series no estacionarias. En una serie no estacionaria, los valores de r_k se van a cero lentamente.

En la Figura 5.9, se muestra el correlograma de una serie no estacionaria se observa que las correlaciones son significativamente distintas a cero aún para retrasos grandes.

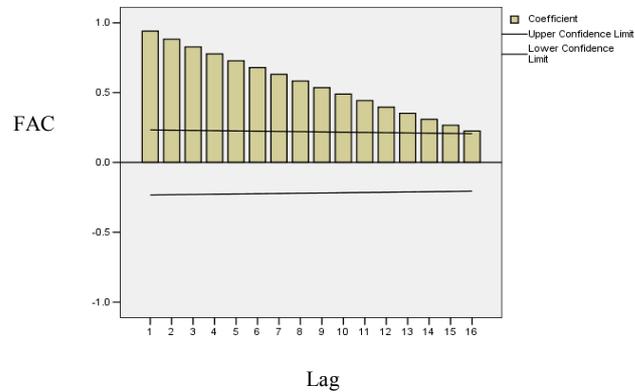


Figura 5.9

4. Fluctuaciones Estacionales. Si una serie de tiempo tiene fluctuaciones estacionales, entonces el correlograma exhibe también oscilaciones con la misma frecuencia.

En la figura 5.10, se muestra el correlograma típico asociado con una serie de tiempo con ciclo estacional, observamos que el comportamiento periódico se presenta también en las correlaciones.

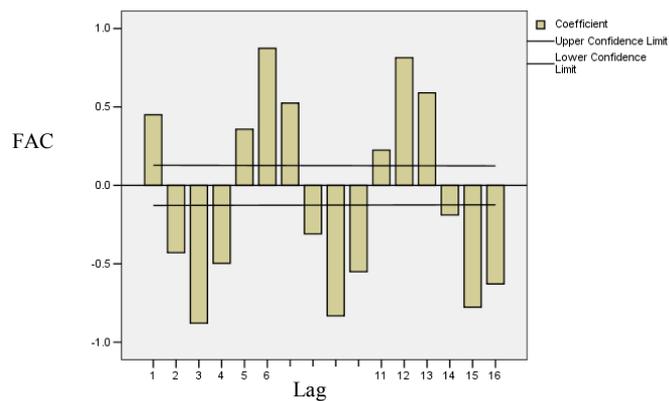


Figura 5.10

5.2.2 Función de auto-correlación parcial (FACP)

Se define como el exceso de correlación en el retraso k que no puede ser explicada por un modelo $AR(k-1)$, es una medición útil para reconocer el orden de los modelos AR (Los modelos AR se describen en la sección 5.3.2).

La función de auto-correlación parcial de la muestra en el desfaseamiento k es:

$$\Gamma_{kk} = \begin{cases} r_1 & \text{si } k=1 \\ \frac{r_k - \sum_{j=1}^{k-1} r_{k-1,j} r_{k-j}}{1 - \sum_{j=1}^{k-1} r_{k-1,j} r_j} & \text{si } k = 2, 3, \dots \end{cases} \quad (2)$$

Donde,

$$r_{jk} = r_{k-1,j} - \Gamma_{kk} r_{k-1, k-j} \quad \text{para } j=1, 2, \dots, k-1$$

La FACP se puede graficar del mismo modo que la FAC, las auto-correlaciones parciales se grafican contra los desfaseamientos $k=1, 2, \dots$

Tanto la FAC como la FACP son útiles para identificar aspectos relacionados con los modelos de Box y Jenkins (ARIMA).

5.3 Modelos de series de tiempo

5.3.1 Modelos MA.

El proceso de promedios móviles.

Las series de tiempo se pueden considerar como un proceso estocástico. Un proceso estocástico es una familia de variables aleatorias asociada a un conjunto índice de números reales: es decir a cada elemento del conjunto de números índice, le corresponde una y solo una variable aleatoria.

Se muestra un ejemplo en la Figura 5.11, aquí se ve la variación del precio de las acciones de Gamesa que evoluciona de forma aleatoria, pero a largo plazo tiene una tasa de crecimiento esperada positiva, que compensa a los inversores por el riesgo que corren al poseer el activo financiero.

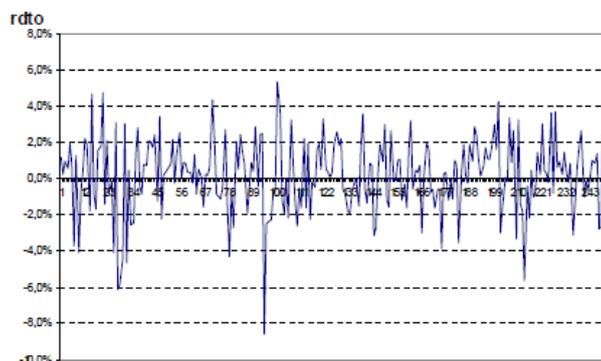


Fig.2 Evolución del rendimiento diario de la acción de Gamesa durante el año 2007 [Elaboración propia]

Figura 5.11

<http://www.ucm.es/info/jmas/mon/27.pdf> consultado enero2011

Un proceso estocástico se dice es puramente aleatorio si está formado de una sucesión de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas. Si $\{Z_t\}$ es un proceso puramente aleatorio con media 0 y varianza σ^2 , el proceso (serie de tiempo) $\{X_t\}$ se dice es un proceso de promedio móvil de orden q (abreviado MA(q)) si:

$$X_t = \beta_0 Z_t + \beta_1 Z_{t-1} + \dots + \beta_q Z_{t-q}$$

Donde las $\{\beta_i\}$ son constantes que generalmente se eligen de modo que $\beta_0=1$.

Se puede agregar una constante μ (sumada) a la ecuación anterior, si se quiere que la media no sea cero.

Una serie de tiempo observada es simplemente una realización de un proceso estocástico: siempre habrá un elemento probabilístico en las observaciones registradas y observadas.

Un proceso MA (q), es un proceso estacionario que satisface:

1. $E(X_t) = 0$
2. $\text{Var}(X_t) = \sigma^2(\beta_1^2 + \beta_2^2 + \dots + \beta_q^2)$
3. La Función de auto-correlación verdadera está dada por:

$$\rho(k) = \begin{cases} \frac{\sum_{i=0}^{q-k} \beta_i \beta_{i+k}}{\sum_{i=0}^q \beta_i^2} & \text{si } k = 1, 2, \dots, q \\ 0 & \text{si } k > q \end{cases}$$

Notamos que, para un modelo MA (q) sólo las primeras q correlaciones difieren de cero. Todas las correlaciones a partir del retraso q+1, teóricamente, son cero. Además, la FACP tiene un decrecimiento exponencial.

Ejemplo: El correlograma de un modelo MA (2) lo vemos en la Figura 5.12

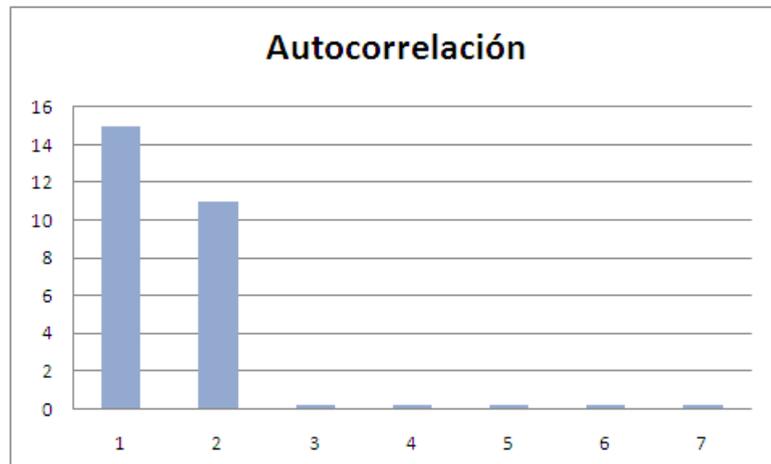


Figura 5.12

Su función de auto-correlación parcial está dada por la ecuación:

$$\Gamma_{kk} = \begin{cases} r_1 & \text{si } k=1 \\ \frac{r_k - \sum_{j=1}^{k-1} r_{k-1,j} r_{k-j}}{1 - \sum_{j=1}^{k-1} r_{k-1,j} r_j} & \text{si } k = 2, 3, \dots \end{cases} \quad (2)$$

Donde,

$$\Gamma_{jk} = r_{k-1,j} - \Gamma_{kk} r_{k-1, k-j} \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, k-1$$

El correlograma correspondiente lo vemos en la Figura 5.13:

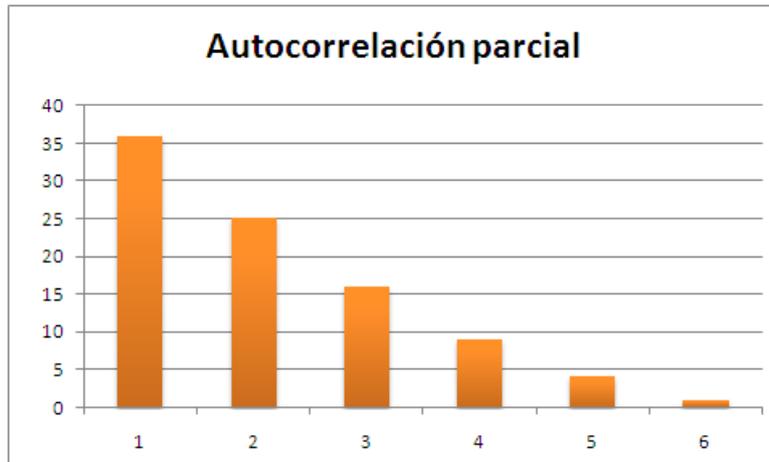


Figura 5.13

Entonces, si pretende utilizar un modelo MA puro, lo que esperaríamos ver es una función de auto-correlación en la serie observada que presente unos cuantos valores notoriamente mayores que cero (orden k del proceso) y luego, valores de auto-correlación cercanos a cero. En la FACP se espera un decrecimiento exponencial hacia cero.

5.3.2 Modelos AR

Suponga nuevamente que $\{Z_t\}$ es un proceso puramente aleatorio con media cero y varianza σ^2 . Se dice que el proceso (serie de tiempo) $\{X_t\}$ es un proceso auto-regresivo de orden p si:

$$X_t = \alpha_1 X_{t-1} + \alpha_2 X_{t-2} + \dots + \alpha_p X_{t-p} + Z_t$$

Un proceso AR (1), entonces es de la forma:

$$X_t = \alpha_1 X_{t-1} + Z_t$$

La cual se puede reescribir como:

$$X_t = Z_t + \alpha Z_{t-1} + \alpha^2 Z_{t-2} + \dots$$

Esto es, se puede expresar como un proceso de promedios móviles de orden infinito

De la ecuación anterior, se concluye que, el proceso AR (1) satisface:

1. $E(X_t) = 0$
2. $\text{Var}(X_t) = \sigma^2(1 + \alpha^2 + (\alpha^2)^2 + \dots)$

El proceso es entonces estacionario sólo si $-1 < \alpha < 1$

En general, todo proceso AR(p) puede expresarse como un proceso de promedios móviles de orden infinito.

Para un proceso AR(1), la función de auto-correlación verdadera está dada por:

$$\rho(k) = \alpha^k \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

La auto-correlación parcial está dada por la ecuación (2).

La FAC para un proceso AR(1) se observa en la Figura 5.14:

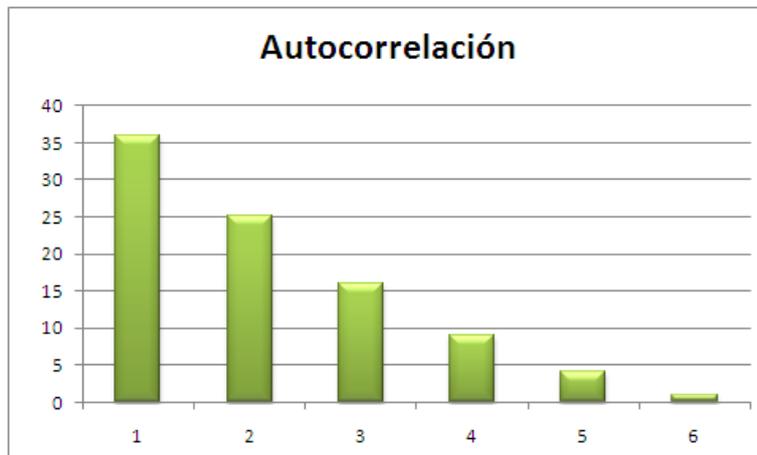


Figura 5.14

Su correspondiente FACP para el mismo proceso AR(1) se ve en la Figura 5.15:

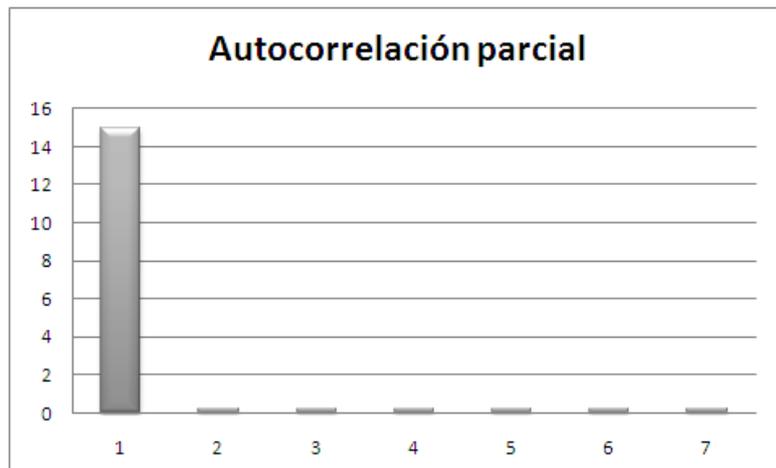


Figura 5.15

Un aspecto a destacar en esta gráfica es que sólo la primera auto-correlación parcial es diferente de cero. En general, un proceso AR (p) tiene sólo los primeros p valores de la FACP distintos a cero, los demás son cero. Esperaríamos entonces, que cuando estemos en presencia de un proceso AR puro, los valores de p auto-correlaciones parciales difieran significativamente de cero y después, se observen valores cercanos a cero.

La FAC para un proceso AR puro, decae exponencialmente hacia cero del mismo modo que la FACP de un proceso MA puro.

5.3.3 Modelos mixtos.

Una clase de modelos útiles en series de tiempo se construyen como combinación de modelos MA y AR. Un modelo mixto con p términos AR y q términos MA, se dice es de orden (p, q), abreviado **ARMA** (p, q), que está dado por:

$$X_t = \alpha_1 X_{t-1} + \alpha_2 X_{t-2} + \dots + \alpha_p X_{t-p} + Z_t + \beta_1 Z_{t-1} + \dots + \beta_q Z_{t-q}$$

5.3.4 Modelos integrados.

En la práctica, la mayoría de las series son no estacionarias, si la media cambia en el tiempo, se puede, a través de varias diferencias sucesivas transformar la serie no estacionaria, en una estacionaria.

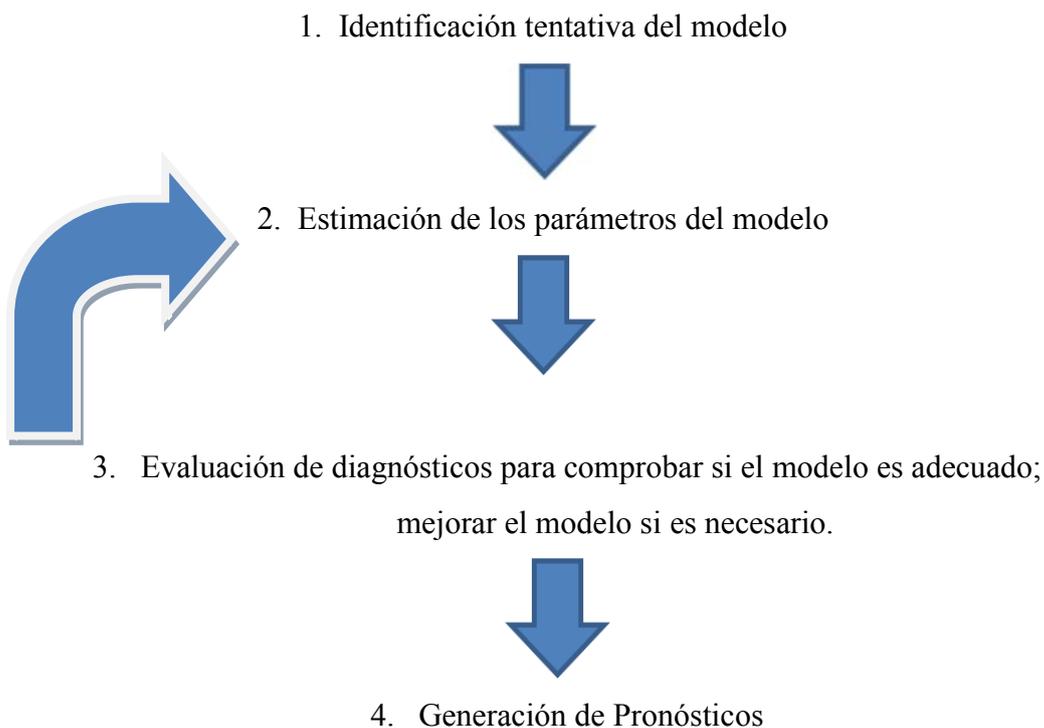
Si después de d diferencias, una serie $\{X_t\}$ se hace estacionaria, se dice es integrado. Si la serie $\{X_t\}$ se reemplaza por tales diferencias $\{W_t\}$ y luego;

$$W_t = \alpha_1 W_{t-1} + \alpha_2 W_{t-2} + \dots + \alpha_p W_{t-p} + Z_t + \beta_1 Z_{t-1} + \dots + \beta_q Z_{t-q}$$

Se dice es un proceso ARIMA de orden (p, d, q) . Esto es un proceso ARMA (p, q) que describe diferencias de los datos originales.

Los Modelos ARIMA son modelos paramétricos que tratan de obtener la representación de la serie en términos de la interrelación temporal de sus elementos. Este tipo de modelos que caracterizan las series como sumas o diferencias, ponderadas o no, de variables aleatorias o de las series resultantes, fue propuesto por Yule y Slutsky en la década de los 20. Fueron la base de los procesos de medias móviles y auto-regresivos que han tenido un desarrollo espectacular tras la publicación en 1970 del libro de Box-Jenkins sobre modelos ARIMA.

Si se pretende usar los modelos ARIMA descritos anteriormente, es conveniente tener en cuenta el siguiente diagrama de flujo, las etapas mostradas en el diagrama se explican, con mayor detalle, enseguida:



1. Identificación. Utilizando los datos y/o cualquier tipo de información disponible sobre cómo ha sido generada la serie, se intentará sugerir una subclase de modelos ARIMA (p, d, q) que merezca la pena ser investigada. El objetivo es determinar los órdenes p, d, y q que parecen apropiados para reproducir las características de la serie bajo estudio y si se incluye o no la constante. En esta etapa es posible identificar más de un modelo candidato a haber podido generar la serie.
2. Estimación. Usando de forma eficiente los datos se realiza inferencia sobre los parámetros condicionada a que el modelo investigado sea apropiado.

Dado un determinado proceso propuesto, se trata de cuantificar los parámetros del mismo,

$$\theta_1, \dots, \theta_q, \phi_1, \dots, \phi_p, \sigma^2 \text{ y, en su caso, } \delta$$

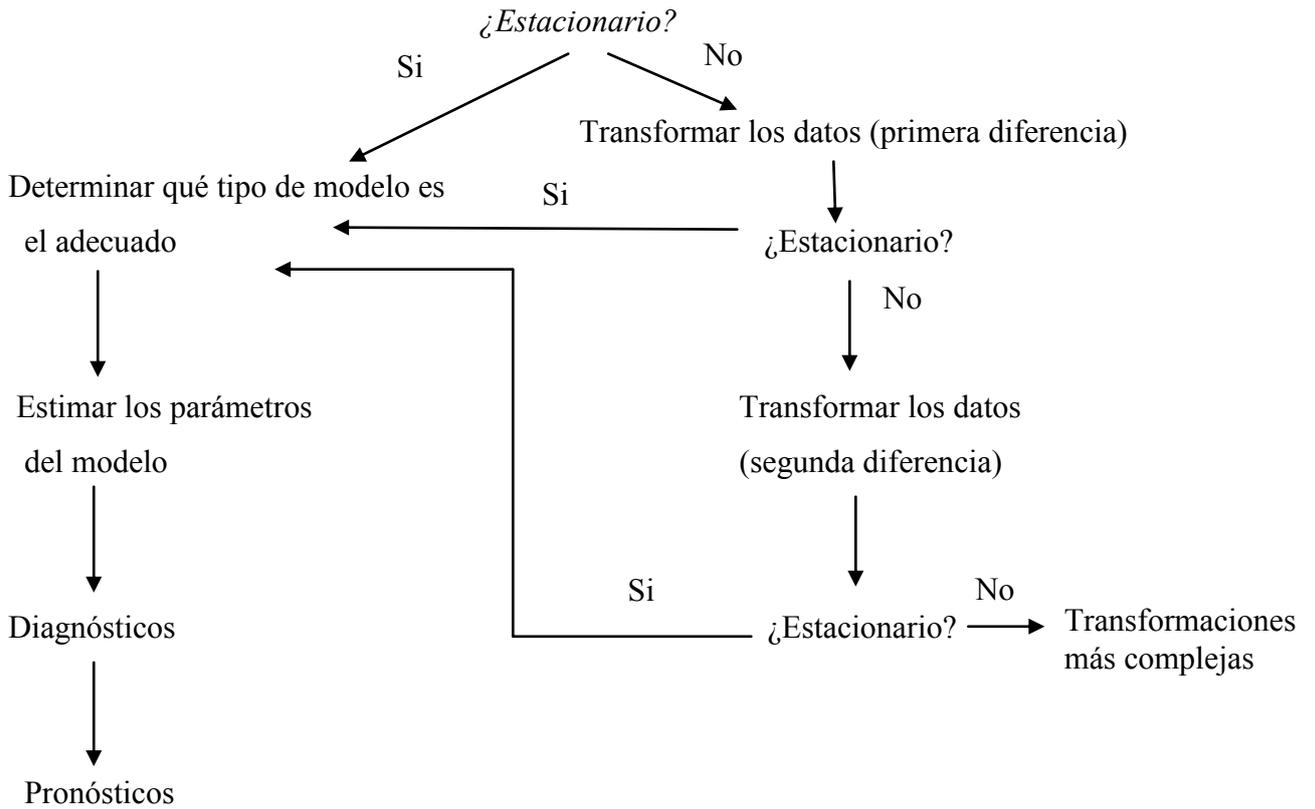
3. Validación. Se realizan contrastes de diagnóstico para comprobar si el modelo se ajusta a los datos, o, si no es así, revelar las posibles discrepancias del modelo propuesto para poder mejorarlo.
4. Predicción. Obtener pronósticos en términos probabilísticos de los valores futuros de la serie. En esta etapa se trata también de evaluar la capacidad predictiva del modelo.

Esta metodología se basa, fundamentalmente, en dos principios:

- Selección de un modelo en *forma iterativa*. En cada etapa se plantea la posibilidad de rehacer las etapas previas.
- Principio de parametrización escueta, también denominado parsimonia. Se trata de proponer un modelo capaz de representar la serie con el mínimo de parámetros posibles y únicamente acudir a una ampliación del mismo en caso de que sea estrictamente necesario para describir el comportamiento de la serie.

Lo anterior también se resume, según (referencia), con el siguiente diagrama:

Proceso en general



Estimación del modelo

- En SPSS o MINITAB, se utiliza la instrucción ARIMA, que se encuentra tomando la alternativa de “series de tiempo” de los menús de “analizar” o “Stat”, respectivamente.
- En esta etapa obtenemos las estimaciones de los parámetros del modelo ARIMA, una vez hemos fijados en la etapa de identificación los órdenes auto-regresivo y de media móvil. Esta estimación se realiza mediante minimización cuadrática del error de ajuste.

Se puede utilizar la distribución t de Student, en cualquiera de los parámetros de un modelo propuesto, para probar la hipótesis nula de que el valor verdadero del parámetro es igual a cero. Para un nivel de significancia α deseado, se eliminan variables del modelo si no cumple con cualquiera de las siguientes condiciones equivalentes:

$$|t| > t_{[\alpha/2]}^{n-n_p}$$

$$p\text{-valor} < \alpha$$

Donde t representa el estadístico de distribución t asociado con cada estimador. Tanto SPSS como MINITAB, presentan, además, el valor P asociado con las pruebas de hipótesis mencionadas.

Así se puede lograr que el modelo sea lo más sencillo posible.

Diagnósticos del modelo.

El análisis de residuales es la mejor opción en cuanto a lo referente a la validación del modelo. Lo que generalmente se revisa es lo siguiente:

1. Análisis gráfico de residuos. Se analiza la serie de tiempo determinada por los residuales del modelo ajustado, se supone que esta serie corresponde con un proceso aleatorio (ruido blanco) con media cero y varianza constante.
2. Las auto-correlaciones, en la serie de residuales, deben ser cero para cualquier retraso, la mejor estadística para determinar si el modelo es adecuado, es la estadística Ljung-Box. Si el valor- p de la estadística Ljung-Box es menor que 0.01, es evidencia muy fuerte de que el modelo no es adecuado. La hipótesis nula detrás de este estadístico, es que las primeras K auto-correlaciones de la serie de residuales son cero.

$$Q^* = n'(n'+2) \sum_{l=1}^K (n'-l)^{-1} r_l^2(\hat{a})$$

3. Análisis de auto-correlación de residuos ^{33 34}

³³ John E. Hanke y Dean W. Wichern, Pronósticos en los negocios. 9ª. Edición, Pearson Educación, México, 2010

³⁴ Bowerman, Bruce L., Richard T.O'Connell y AnneB. Koehler, Pronósticos, series de tiempo y regresión. Un enfoque aplicado, 4ª ed, pp 1-13

Pronósticos.

Los modelos ARIMA permiten además la generación de pronósticos para el movimiento futuro de una serie de tiempo, sin embargo, la técnica que se emplee para este fin, puede tener variantes según el tipo de pronóstico que se pretenda. Si se quieren pronósticos a muy largo plazo, los modelos ARIMA no representan la mejor alternativa.

Igualmente, si no se dispone de una cantidad suficiente de datos, alternativas como el suavizamiento exponencial o métodos de promedios móviles pueden representar una mejor opción. En general, se recomiendan los modelos ARIMA si cuenta con al menos 100 observaciones de una serie de tiempo y se pretende establecer un pronóstico a no muy largo plazo. Debido a todo lo mencionado previamente, lo relativo a la generación de pronósticos será revisado en la siguiente sección.

5. 4 Medición del error en los pronósticos

Cualquiera que sea la técnica utilizada para hacer pronósticos, tendrá incertidumbre asociada en su estimación, generalmente, la serie observada se divide en dos partes, desde algún punto en el tiempo. Una parte contiene las observaciones más recientes y la otra las menos recientes. Con las observaciones menos recientes, se hacen pronósticos, con una técnica particular, para tiempos correspondientes con las observaciones más recientes, así el pronóstico puede ser comparado con el valor real observado y así podemos advertir qué tan adecuada puede ser una técnica de pronósticos. Además, con este procedimiento, se pueden comparar dos o más técnicas para hacer pronósticos, para esto, resulta conveniente definir los siguientes indicadores, que evalúan, de cierto modo, el nivel de precisión de cada técnica particular de hacer pronósticos.

El error en el pronóstico para un pronóstico particular e_t es:

$$e_t = y_t - \hat{y}_t$$

Globalmente, se pueden “medir” los errores para un modelo o una técnica para hacer pronósticos de una serie de tiempo a través de indicadores como el MAD, MSD, MAPE y MPE que a continuación se describen:

5.4.1 Desviación media absoluta (MAD)

La Desviación Media Absoluta (MAD) mide la precisión de un pronóstico mediante el promedio de la magnitud de los errores de pronóstico (valores absolutos de cada error).

MAD resulta de gran utilidad cuando el analista desea medir el error de pronóstico en las mismas unidades de la serie original. La siguiente ecuación muestra como se calcula la MAD:

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |e_t|}{n} = \frac{\sum_{t=1}^n |y_t - \hat{y}_t|}{n}$$

5.4.2 Error cuadrático medio (MSD)

Otra técnica para evaluar una técnica de pronóstico es el Error Cuadrático Medio (MSD). Cada error o residual se eleva al cuadrado; luego estos valores se suman y se divide entre el número de observaciones. Este enfoque penaliza los errores mayores de pronósticos, ya que eleva cada uno al cuadrado. La ecuación para el cálculo del MSD, es la siguiente:

$$MSD = \frac{\sum_{t=1}^n (e_t)^2}{n} = \frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2}{n}$$

El **MAD** y el **MSD** por sí mismos, no nos dicen mucho, pero sirven para comparar modelos de pronóstico y elegir el que mejor predice los valores, también sirven para monitorear el desempeño de un modelo: cuando aumentan de repente, significa que el modelo ya no es tan atinado.

5.4.3 Error porcentual absoluto medio (MAPE)

El Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) se calcula encontrando el error absoluto en cada periodo, dividiendo éste entre el valor real observado, para ese periodo y después promediando estos errores absolutos de porcentaje. La siguiente ecuación muestra el cálculo del MAPE:

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{|y_t - \hat{y}_t|}{|y_t|}}{n}$$

El MAPE proporciona una indicación de que tan grandes son los errores de pronóstico comparados con los valores reales de la serie.

También se puede utilizar el MAPE para comparar la precisión de la misma u otra técnica sobre dos series completamente diferentes.

5.4.4 Error porcentual medio (MPE)

A veces resulta necesario determinar si un método de pronóstico está sesgado (pronóstico consistentemente alto o bajo). En estos casos, se emplea el Porcentaje Medio de Error (PME), que se calcula encontrando el error en cada periodo, dividiendo esto entre el valor real de ese periodo y promediando después estos porcentajes de error.³⁵ El MPE está dado por la ecuación:

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{(y_t - \hat{y}_t)}{y_t}$$

Si un enfoque de pronóstico no está sesgado, la ecuación del MPE producirá un porcentaje cercano a cero. Si el resultado es un porcentaje negativo grande, el método de pronóstico está sobrestimado de manera consistente. Si el resultado es un porcentaje positivo grande, el método de pronóstico esta subestimado de forma consistente.

³⁵ Makridakis - Wheelwright, Métodos de pronóstico, México, D.F., Limusa, 1998, pp63-74
Mahmoud, E., "The Evaluation of forecasts", en S. Makridakis y S. Wheelwright, The Handbook of Forecasting, 2a. ed., Wiley, Nueva York.

En parte, la decisión para utilizar una técnica de pronóstico en particular, depende de si la técnica producirá errores de predicción que se juzguen como suficientemente pequeños. Es en este efecto realista, de esperarse, que una técnica produzca errores de pronóstico relativamente bajos sobre una base consistente.

EJEMPLO DEL CÁLCULO DE LOS ERRORES:

Valor real	Valor predicho	Error	Desviación Absoluta	Error cuadrático
y_t	\hat{y}_t	e_t	$ e_t = y_t - \hat{y}_t $	$(e_t)^2 = (y_t - \hat{y}_t)^2$
25	22	3	3	9
28	30	-2	2	4
29	30	-1	1	1
Suma		0	6	14
Promedio			3	7

5.5 PRONÓSTICOS

Los modelos ARIMA permiten generar pronósticos a corto plazo, básicamente, siguiendo la ecuación asociada al correspondiente modelo ajustado, una vez estimados los parámetros del modelo. En esta sección revisaremos, brevemente, otras alternativas para hacer pronósticos, sobre todo, en situaciones de pronósticos a largo plazo y pronósticos a corto plazo con series de tiempo pequeñas. Métodos de pronósticos a corto plazo con muestras pequeñas se conocen también como técnicas de suavizamiento, sólo serán revisados, por considerarlos una alternativa conveniente y efectiva en muchos casos, pero, en realidad, no fueron empleados en el trabajo posterior, por resultar menos convenientes que los modelos ARIMA, en base a la cantidad de información disponible.

5.5.1 Métodos para establecer pronósticos a largo plazo.

Los modelos ARIMA se pueden emplear para hacer pronósticos a futuro, aunque a no muy largo plazo. Si se quiere hacer *pronóstico a largo plazo* es preferible ajustar curvas de tendencia, las alternativas, generalmente utilizadas, son las siguientes: *lineal*, *cuadrática*, *exponencial* y *curva S*.

En pocas ocasiones podemos suponer que la tendencia queda representada mediante alguna función tan simple como una línea recta durante todo el periodo en el cual observamos la serie de tiempo. Las curvas de tendencia, además de ser útiles para pronósticos a largo plazo, a menudo conviene ajustar una *curva de tendencia* a una serie de tiempo porque proporcionan cierto indicio de la dirección general de la serie observada y puede dar una imagen más clara de la estacionariedad.

Si la tendencia parece ser aproximadamente *lineal*, es decir, aumenta o disminuye como una línea recta, entonces se representa por la ecuación:

$$\hat{T}_t = b_0 + b_1 t$$

En donde \hat{T}_t es el valor pronosticado de la tendencia para el tiempo t .

t representa el tiempo, la variable independiente y ordinariamente toma los valores 1,2,3,...correspondientes a periodos consecutivos.

El coeficiente de la pendiente, b_1 es el incremento o decremento promedio de T para cada incremento de un periodo en el tiempo.

Los modelos lineales, como dijimos, suponen que una variable aumenta (o disminuye) por una cantidad constante en cada periodo de tiempo. Existen situaciones en donde lo anterior difícilmente aplica, por ejemplo, en los incrementos por periodo en la curva del ciclo de vida de un producto, que son muy diferentes dependiendo de la etapa del ciclo. Se necesita una curva diferente de una línea recta para modelar la tendencia del ciclo de vida de un producto nuevo. Ver Figura 5.16

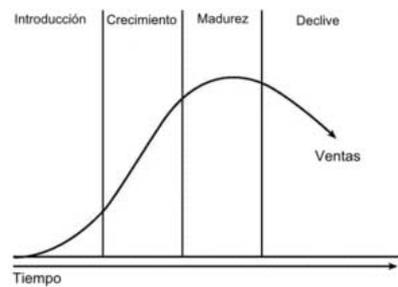


Figura 5.16 ciclo de vida típico de un producto nuevo
libreexpresion.org/control-mental-relajense-gr... consultado 15 diciembre 2010

Una función simple que toma en cuenta la curvatura es la ecuación de la tendencia *cuadrática*:

$$\hat{T}_t = b_0 + b_1t + b_2t^2$$

Cuando una serie de tiempo inicia lentamente y luego parece que se incrementa a un ritmo creciente de manera que la diferencia porcentual entre una observación y otra es constante, es posible ajustar una tendencia *exponencial*. (ver Figura 5.17). La tendencia exponencial está dada por la siguiente ecuación:

$$\hat{T}_t = b_0 b^{t1}$$

El coeficiente b_1 está relacionado con la tasa de crecimiento.

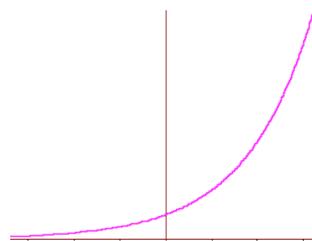


Figura 5.17

Las *curvas de crecimiento en forma de S*, del tipo logístico o de Gompertz representan la tendencia de muchas industrias y líneas de productos cuyo crecimiento registra una tasa de declinación conforme maduran. La Figura 5.18 muestra una de las formas generales de la curva de Gompertz.

La curva de Gompertz está dada por:

$$\log x_t = a - br^t$$

donde a, b, r son parámetros con $0 < r < 1$, mientras que la curva logística está dada por:

$$x_t = a/(1 + be^{-ct})$$

Esta curva tiene forma de S y se aproxima a un valor asintótico cuando t tiende a infinito.

Para todas las curvas de este tipo, la función de ajuste proporciona una medida de la tendencia, y los residuos proporcionan una estimación de las variaciones locales, donde los residuos son las diferencias entre las observaciones y los valores correspondientes de la curva ajustada.

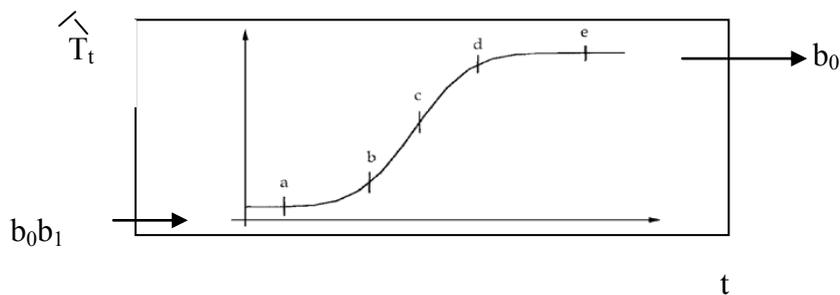


Figura 5.18
Curva de tendencia de Gompertz

Tendencia lineal, cuadrática y exponencial asumen tendencias crecientes o decrecientes a largo plazo y la curva de tendencia S asume tendencia asintótica a largo plazo (se estabiliza sobre un valor constante a la larga).³⁶

³⁶ C. Chatfield, The analysis of time series an introduction, 4a. edición.

5.5.2 Pronósticos a corto Plazo.

Los métodos de suavizamiento generan pronósticos con base en un promedio ponderado, son llamados así porque suprimen “picos” en la gráfica de una serie de tiempo. Los pronósticos se generan base en el promedio ponderado de valores pasados relacionando los valores de la serie observada con una serie de ponderadores o pesos. Si el ponderador o peso es el mismo para todas las observaciones pasadas, entonces el promedio ponderado es el promedio simple.

Las técnicas de suavizamiento pueden usar, para el cálculo del pronóstico, promedios de la serie completa o sólo de cierta cantidad de los datos más recientes funcionan mejor para datos sin tendencia, ni estacionalidad. Entre estas alternativas mencionamos las siguientes:

✓ Media Total (Simple Average)

$$\hat{Y}_{t+1} = \frac{(Y_1 + Y_2 + \dots + Y_t)}{t}$$

- Es un promedio simple, que se determina calculando la media de todos los datos anteriores y se usa esa media para pronosticar el siguiente periodo.
- Este método puede ser utilizado, con mayor efectividad, cuando los datos poseen estabilidad y no tienen estacionalidad.

$$MA(k) = \hat{Y}_{t+1} = \frac{(Y_t + Y_{t-1} + \dots + Y_{t-k+1})}{k}$$

✓ Promedio Móvil de orden k (Moving Average k)

$$MA(k) = \hat{Y}_{t+1} = \frac{(Y_t + Y_{t-1} + \dots + Y_{t-k+1})}{k}$$

Donde:

$MA(k)$: Promedio Móvil de orden k

\hat{Y}_{t+1} : Valor pronosticado en el periodo $t+1$

Y_t : Valor en el periodo t

k : Número de términos en el promedio móvil

- El MA para el período t es la media aritmética de las k observaciones más recientes.
- Mientras más grande es el orden del MA utilizado, mayor es el efecto del suavizamiento (supresión de “picos”), pero como pronóstico pone muy poca atención a las fluctuaciones.
- No se adapta adecuadamente si hay tendencia o ciclos. Un promedio móvil de orden k es el valor de la media de k observaciones consecutivas. El valor del promedio móvil más reciente indicará el pronóstico del siguiente periodo.

Ejemplo:

Se tomaron 53 valores semanales de las partículas PM 2.5 en el año 2008 y en MINITAB se usó el promedio móvil con una longitud de promedio móvil de 3, se tiene lo siguiente:

Moving Average

Length 3

Accuracy Measures

MAPE 17.0029

MAD 4.1858

MSD 28.5611

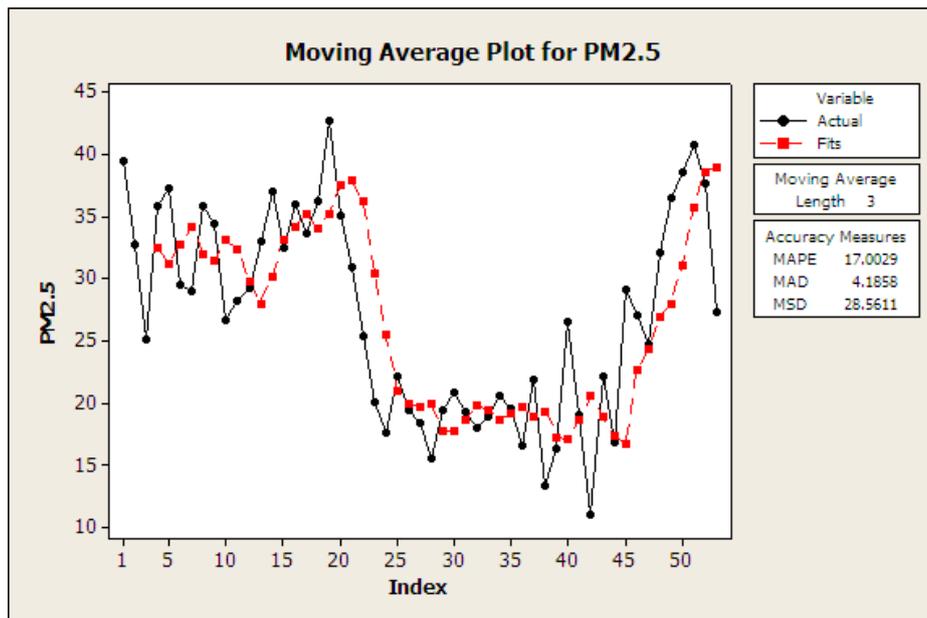


Figura 5.19

La Figura 5.19 ilustra el uso del método de promedio móvil con una longitud de orden 3.

✓ Métodos de suavizamiento exponencial:

Suavizamiento exponencial es un método seleccionado por muchas empresas, por su simplicidad. Estos modelos se desempeñan bien con series de tiempo con pocas observaciones, son fáciles de aplicar y pueden ser automatizados, permitiendo ser utilizados a gran escala. Los modelos de suavizamiento exponencial pueden ser adaptados a datos con diferentes tipos de tendencias y patrones estacionales. Los modelos son adaptativos y pronostican dando mayor importancia o ponderación a los datos más recientes sobre los datos más distantes en el pasado.³⁷

El más sencillo de estos métodos es el método de suavizamiento simple, en cuyo caso el patrón es horizontal (sin tendencia). Los métodos de Holt y de Winters son extensiones del suavizamiento exponencial. El método de Holt puede ser utilizado cuando existe presencia de patrón de tendencia en la serie observada. El método de Winters permite incluir tanto patrones de tendencia como de estacionalidad.

³⁷ <http://www.dandoenelblanco.com/2008/07/modelos-de-series-de-tiempo-para-pron%C3%B3sticos-de-demanda.html> consultada el 29 de noviembre 2010

- Suavizamiento exponencial simple.

No se adapta adecuadamente si hay tendencia o ciclos. Es un procedimiento para revisar de forma continua un pronóstico a la luz de la experiencia más reciente.

En una representación de suavizamiento exponencial, el nuevo pronóstico (para el tiempo $t + 1$) puede considerarse como la suma ponderada de la nueva observación (en el tiempo t) y el antiguo pronóstico (para el tiempo t). Se asigna el peso $0 \leq \alpha \leq 1$ al nuevo valor observado, y el peso $(1-\alpha)$ al último pronóstico. Así, la ecuación de suavizamiento exponencial es:

$$\hat{Y}_{t+1} = \alpha Y_t + (1 - \alpha)\hat{Y}_t$$

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

Donde:

\hat{Y}_{t+1} es el nuevo valor suavizado o el valor del pronóstico para el siguiente periodo.

α se le llama la constante de suavizamiento $0 \leq \alpha \leq 1$

Y_t es la nueva observación o el valor real de la serie en el periodo t .

\hat{Y}_t es el último valor suavizado o el pronóstico del periodo t .

La ecuación anterior se puede escribir como:

$$\hat{Y}_{t+1} = \hat{Y}_t + \alpha(Y_t - \hat{Y}_t)$$

En la ecuación anterior notamos que α sirve como el factor de ponderación, determina el grado con el cual la observación actual influye en el pronóstico de la siguiente observación. Cuando α es cercano a 1, el nuevo pronóstico será, en esencia, la observación actual. Y a la inversa, cuando α es cercano a cero, el nuevo pronóstico será muy similar al pronóstico anterior, y la observación actual tendrá muy poco efecto.

Finalmente, la siguiente ecuación supone que, para el tiempo t , $\hat{Y}_t = \alpha\hat{Y}_{t-1} + (1 - \alpha)Y_{t-1}$, y al sustituir en la ecuación anterior, se obtiene:

$$\hat{Y}_{t+1} = \alpha Y_t + \alpha(1 - \alpha)Y_{t-1} + \alpha(1 - \alpha)^2 Y_{t-2} + \alpha(1 - \alpha)^3 Y_{t-3} + \dots$$

La sustitución continua (de \hat{Y}_{t-1} y así sucesivamente) indica que \hat{Y}_{t+1} puede escribirse como la suma de la Y actual y las anteriores con pesos que descienden exponencialmente. Es decir, \hat{Y}_{t+1} es un valor suavizado exponencialmente. La rapidez con la cual las observaciones pasadas pierden su efecto depende del valor de α .

El valor asignado a α es la clave del análisis. Si se desea que las predicciones sean estables y las variaciones aleatorias se suavicen, se requiere un valor pequeño de α . Si se desea una respuesta rápida a un cambio real en el patrón de observaciones, un valor más grande de α es el apropiado.

Ejemplo:

Tomando como en el ejemplo anterior los mismos valores semanales de las partículas PM 2.5 en el año 2008, en MINITAB se obtiene lo siguiente:

```
Smoothing Constant  
Alpha 0.632748
```

```
Accuracy Measures
```

```
MAPE 17.5212  
MAD 4.3185  
MSD 27.4900
```

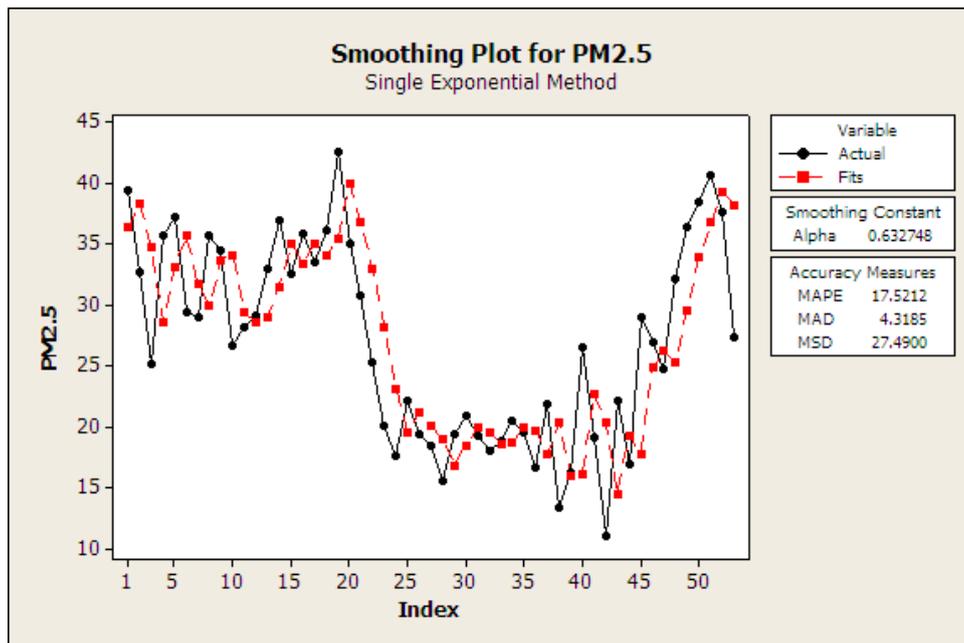


Figura 5.20

La Figura 5.20 nos muestra el método de suavizamiento exponencial con una constante de suavizamiento $\alpha=0.632748$.

- Suavizamiento lineal de Holt (doble suavizamiento exponencial)

Holt desarrolló un método de suavizamiento exponencial, conocido como *suavizamiento exponencial lineal de Holt*, el cual toma en cuenta la evolución local lineal de las tendencias en una serie de tiempo y puede usarse para generar pronósticos. Cuando se anticipa una tendencia en una serie de tiempo, se requiere un estimado de la pendiente actual, así como del nivel actual. La técnica de Holt suaviza directamente el nivel y la pendiente usando diferentes constantes de suavizamiento para cada uno. Estas constantes proporcionan estimados del nivel y la pendiente que se adaptan en el tiempo, conforme se dispone de nuevas observaciones. Una de las ventajas de la técnica de Holt es que ofrece un alto grado de flexibilidad en la selección de coeficientes con los cuales se controla el nivel y la tendencia.

Las tres ecuaciones usadas en el método de Holt son:

1. La serie suavizada exponencialmente o nivel actual estimado:

$$L_t = \alpha Y_t + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1})$$

2. El estimado de la tendencia:

$$T_t = \beta (L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1}$$

3. El pronóstico para los p periodos del futuro

$$\hat{Y}_{t+p} = L_t + pT_t$$

Donde

L_t Es el nuevo valor suavizado (estimado del nivel actual).

$\alpha = 1$, constante de suavizamiento para el nivel $0 \leq \alpha \leq 1$.

Y_t Nueva observación o valor real de la serie en el periodo t.

β Constante de suavizamiento para el estimado de la tendencia $0 \leq \beta \leq 1$.

T_t Estimado de la tendencia.

p periodos a pronosticar en el futuro.

\hat{Y}_{t+p} Pronóstico para el periodo p en el futuro

Al igual que en el suavizamiento exponencial simple, las constantes de suavizamiento α y β pueden seleccionarse subjetivamente o generarse minimizando una medida de error del pronóstico. Pesos grandes tienen como resultado cambios más rápidos en el componente; pesos pequeños tienen como resultado cambios menos rápidos. Por lo tanto, cuanto mayores son los pesos, los valores de suavizamiento seguirán más a los datos; cuanto menores son los pesos, los valores de suavizamiento seguirán más a los valores de suavizamiento previos.

El pronóstico depende de los valores alfa y beta elegidos, MINITAB puede estimar los valores óptimos de alfa y beta para series de tiempo con una cantidad no muy grande de valores.

Ejemplo:

Como en los ejemplos anteriores se tomaron los mismos valores semanales de las partículas PM 2.5 en el año 2008, en MINITAB se obtiene lo siguiente:

Smoothing Constants
Alpha (level) 0.652833
Gamma (trend) 0.040172

Accuracy Measures
MAPE 17.5325
MAD 4.3772
MSD 28.5016

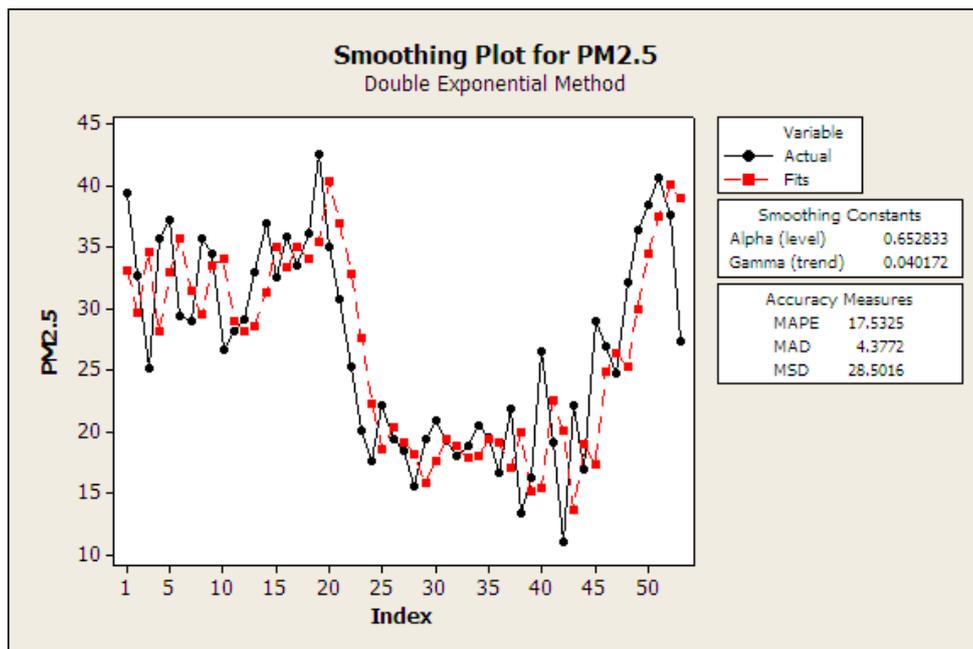


Figura 5.21

La Figura 5.21 nos muestra el uso del método de doble suavizamiento exponencial con constantes de suavizamiento $\alpha=0.652833$ y $\gamma=0.040172$

- Suavizamiento multiplicativo de Winters

Es el método de suavizamiento exponencial lineal y estacional, es una extensión del método de Holt. El método de Winters permite incorporar tendencia y ciclos estacionales para hacer pronósticos.

En la versión multiplicativa de Winters, la estimación de la estacionalidad está dada por un índice estacional.

Las cuatro ecuaciones usadas en el suavizamiento (multiplicativo) de Winters son:

1. Series suavizadas exponencialmente o nivel estimado:

$$L_t = \alpha \frac{Y_t}{S_{t-s}} + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1})$$

2. Estimación de tendencia:

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1}$$

3. Estimado de estacionalidad:

$$S_t = \gamma \frac{Y_t}{L_t} + (1 - \gamma)S_{t-s}$$

4. El pronóstico para p periodos futuros:

$$\hat{Y}_{t+p} = (L_t + pT_t)S_{t-s+p}$$

Donde,

L_t Nuevo valor suavizado (estimado de nivel actual)

α Constante de suavizamiento del nivel.

Y_t Nueva observación o valor real en el periodo t .

β Constante de suavizamiento para el estimado de tendencia.

T_t Estimado de tendencia.

γ Constante de suavizamiento para el estimado de estacionalidad.

S_t Estimado de estacionalidad.

p periodos futuros a pronosticarse.

s Longitud de la estacionalidad.

Al igual que en el suavizamiento exponencial lineal de Holt, los pesos α , β y γ pueden seleccionarse subjetivamente o generarse al minimizar una medida de error de

pronóstico. El enfoque más común para determinar estos valores es usar un algoritmo de optimización para obtener las constantes óptimas de suavizamiento.

El método de Winters ofrece una manera fácil de tomar en cuenta la estacionalidad cuando los datos muestran un patrón estacional. El suavizamiento exponencial es una técnica habitual para pronósticos de corto plazo. Sus mayores ventajas son su bajo costo y sencillez. Los métodos de suavizamiento exponencial son atractivos porque generan pronósticos usando todas las observaciones y asignando pesos que disminuyen exponencialmente conforme las observaciones se vuelven más antiguas.³⁸

Ejemplo:

Se toman los mismos valores semanales de las partículas PM 2.5 en el año 2008 como en los ejemplos pasados y se obtiene en MINITAB lo siguiente:

Smoothing Constants

Alpha (level)	0.6
Gamma (trend)	0.2
Delta (seasonal)	0.1

Accuracy Measures

MAPE	17.1538
MAD	4.1993
MSD	27.0737

³⁸ John E. Hanke y Dean W. Wichern, Pronósticos en los negocios. 9ª. Edición, Pearson Educación, México, 2010

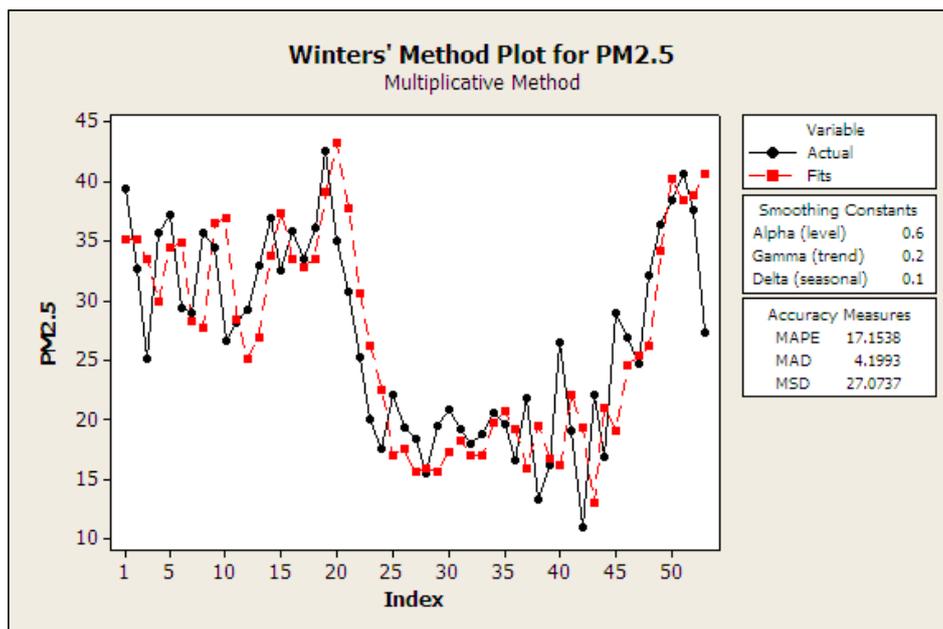


Figura 5.22

La Figura 5.22 nos muestra el método de Winters con constantes de suavizamiento: Alfa=0.6, gamma=0.2 y delta=0.1

CUADRO RESUMEN DEL ERROR CUADRÁTICO MEDIO (MSD) DE CADA MÉTODO DE SUAVIZAMIENTO:

<i>MÉTODO DE SUAVIZAMIENTO</i>	<i>MSD</i>
Promedio móvil	28.5611
Suavizamiento exponencial	27.4900
Doble suavizamiento exponencial	28.5016
Suavizamiento multiplicativo de Winters	27.0737

Cuadro 1

En el cuadro 1 se puede apreciar que el método de Winters tiene el menor MSD por lo que se puede decir que de los 4 métodos es el mejor método de predicción.

Resumen y conclusiones

El propósito más importante relacionado con el estudio de una serie de tiempo, es la formulación de pronósticos sobre el movimiento futuro de la serie. Para este fin, se dispone de más de una alternativa. La elección depende principalmente de dos elementos: la cantidad de observaciones en la serie y el tipo de pronóstico deseado, a corto o a largo plazo.

Para los pronósticos a largo plazo, es preferible ajustar curvas de tendencia, igualmente, existen distintas alternativas para elegir la curva de tendencia, lineal, cuadrática, exponencial o curvas de Gompertz. Estas últimas tienen la ventaja de tener una tendencia asintótica hacia valores constantes cuando el tiempo tiende a infinito, razón por la cual resultan útiles para nuestro trabajo particular.

Para hacer pronósticos a corto plazo, podemos hacer uso tanto de los modelos ARIMA como de las llamadas técnicas de suavizamiento. Las técnicas de suavizamiento dependen de parámetros arbitrarios (α, β, γ) o constantes de suavizamiento cuyo valor incide fuertemente en el pronóstico, y aunque el programa MINITAB permite encontrar valores óptimos para estas constantes, si las series son grandes, presenta problemas el algoritmo que usa este programa para determinar estos valores óptimos.

Se pueden comparar dos o más técnicas o modelos para la formulación de pronósticos a través de indicadores tales como el MAD, MSD, MAPE o MPE que, básicamente, evalúan las diferencias globales entre los pronósticos y los valores reales de la serie (errores de estimación) en un periodo de tiempo donde se conozcan estos valores reales en la serie de tiempo bajo estudio.

Capítulo 6

Análisis de series de tiempo de los componentes del IMECA

Introducción

Las series de tiempo que reporta el SIMAT de cada uno de los contaminantes asociados al IMECA se van a analizar con los métodos descritos en el capítulo anterior. Primero, se revisará la tendencia a largo plazo para cada uno de los componentes, para esto, se ajusta una curva de tendencia a cada una de las series de cada contaminante, el tipo de curva propuesta, en todos los casos, es de las llamadas de forma “S”. Se elige esta porque tiene comportamiento asintótico cuando t (tiempo) tiende a infinito. Esto nos ayudará a determinar qué contaminantes representan riesgos, a largo plazo, para la salud. Se ajustará un modelo ARIMA para aquellos componentes cuya tendencia a largo plazo esté fuera de las normas establecidas para tener un modelo con el cual se puedan hacer pronósticos a corto plazo (tres meses).

Para finalizar el capítulo se hará un análisis de regresión para estudiar la relación de cuatro variables meteorológicas: velocidad del viento, humedad, dirección del viento y temperatura frente al IMECA para analizar cuáles de estas variables explican en mayor medida la variación del IMECA.

6.1 Tendencia a largo plazo de cada componente del IMECA

En la Figura 6.1 se observa el ajuste de una curva de Gompertz (de forma de S) para los datos reportados por el SIMAT del Ozono (O_3). El ajuste se realiza usando el programa MINITAB:

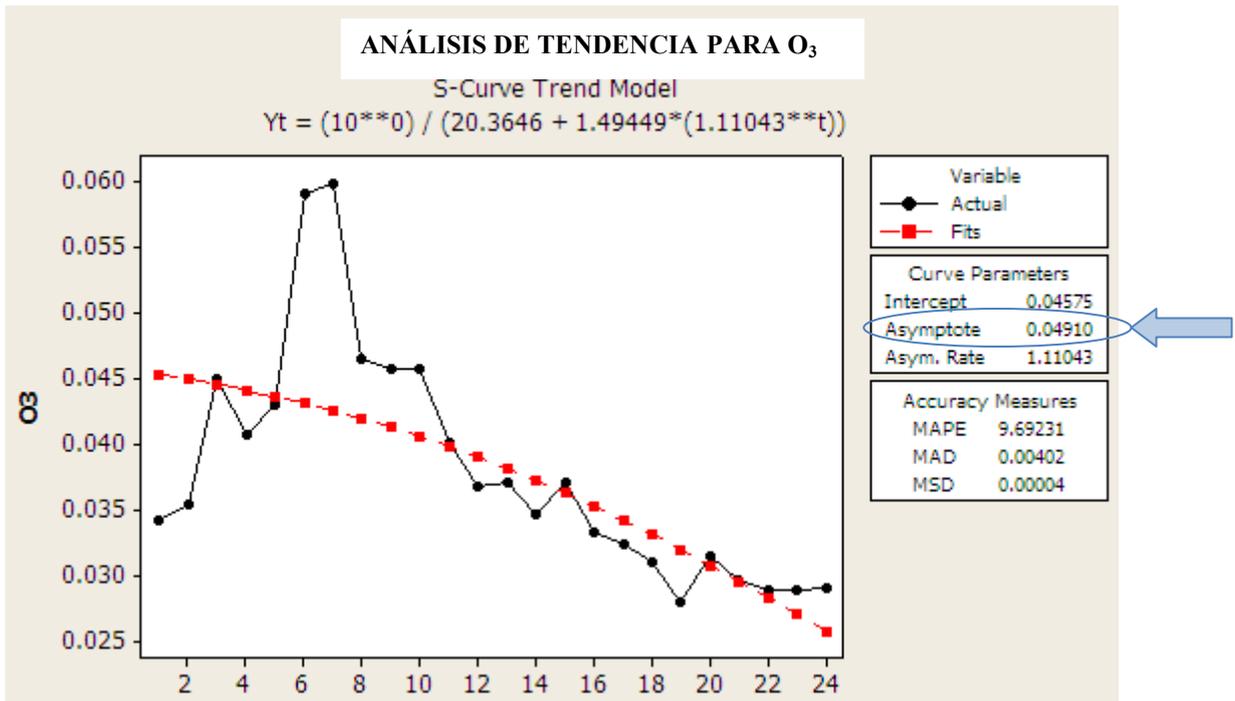


Figura 6.1

Se rectificó el cálculo de la asíntota en MATHEMATICA y se encontró que la asíntota cuando t tiende a ∞ , no es 0.04910 como MINITAB lo muestra, sino 0. La asíntota que da MINITAB de 0.04910 es la resultante cuando t tiende a $-\infty$, que no es la que importa en relación con el análisis. El límite máximo permisible según la Norma Oficial Mexicana (ver capítulo 2) es de 0.11 ppm , por lo que, de acuerdo a la gráfica, se puede concluir que este contaminante esta dentro de los límites, como se puede observar, la tendencia de este contaminante es decreciente, y a largo plazo, estará **bajo control**. De hecho, aún los puntos más elevados de la gráfica de la figura 6.1, están por debajo de la Norma Oficial Mexicana.

Como los resultados observados no se consideran de riesgo inmediato, ni a largo plazo, el análisis para este componente, aquí termina.

En la Figura 6.2 se observa el ajuste de una curva de Gompertz para los datos reportados por el SIMAT del monóxido de carbono (CO). El ajuste se realiza con el programa MINITAB:

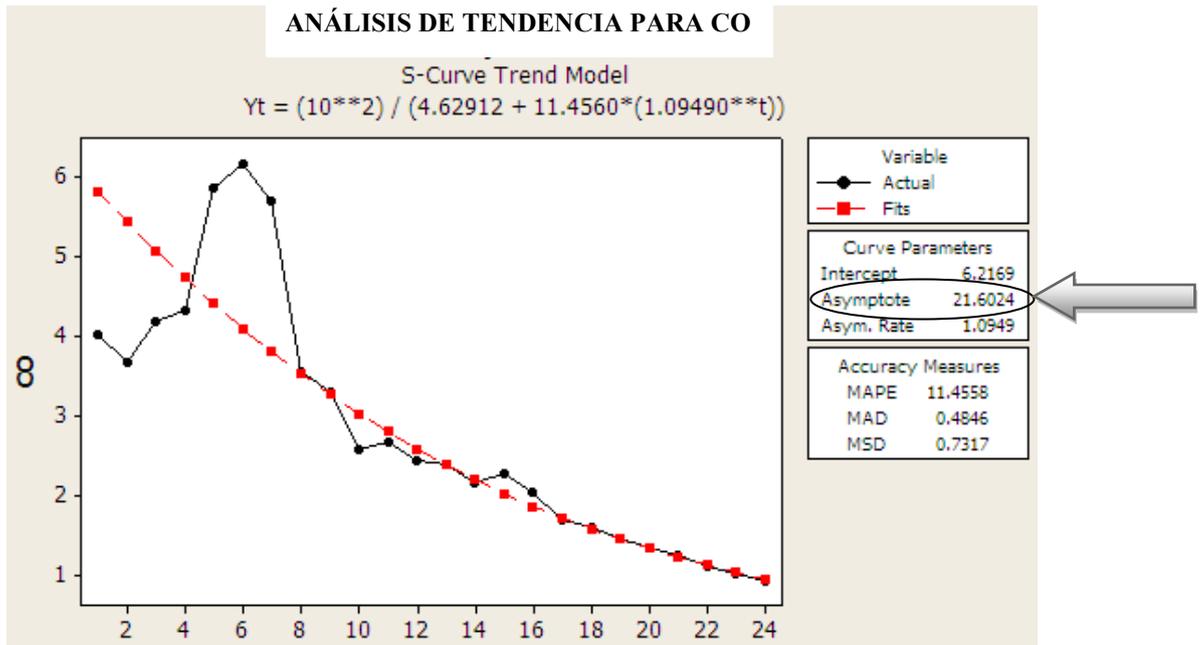


Figura 6.2

En la asíntota se hizo una corrección ya que la asíntota que aparece en los resultados de MINITAB corresponde, nuevamente, a la asíntota cuando t tiende a $-\infty$. Si t tiende a $+\infty$, la asíntota es cero. El límite máximo permisible según la Norma Oficial Mexicana (ver capítulo 2) es de 11ppm , por lo que se puede decir, observando la gráfica, que no preocupa este componente, pues está **bajo control** con tendencia decreciente.

Como los resultados observados no se consideran de riesgo inmediato, ni a largo plazo, el análisis de este componente aquí termina.

En la Figura 6.3 se observa el ajuste de una curva de Gompertz para los datos reportados por el SIMAT del dióxido de azufre (SO_2). El ajuste se realiza con el programa MINITAB:

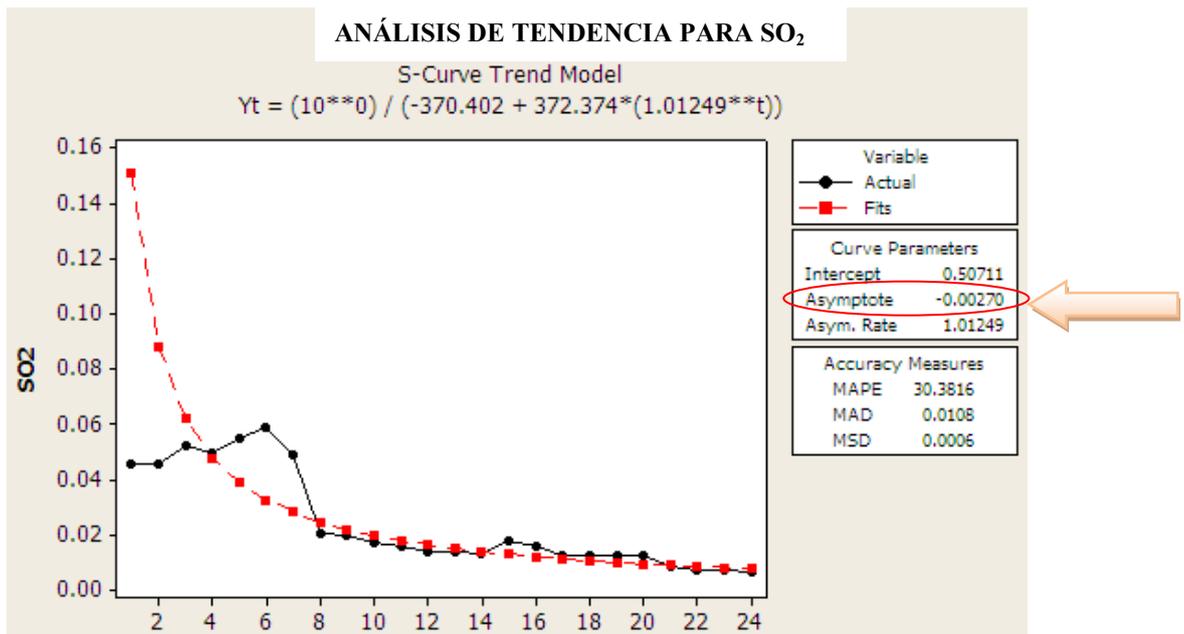


Figura 6.3

En este caso, al igual que los anteriores, se corroboró por medio de MATHEMATICA el cálculo de la asíntota, obteniendo valor de cero cuando t tiende a $+\infty$. El valor máximo permisible según la Norma Oficial Mexicana (ver capítulo 2) es de 0.03 ppm en una media aritmética anual, por lo que se puede concluir que este contaminante está **bajo control**. Los valores reportados en los últimos 16 años, se pueden ver en la gráfica, están todos debajo del valor máximo permitido, con tendencia decreciente hacia cero.

Como los resultados observados no se consideran de riesgo inmediato, ni a largo plazo, el análisis aquí termina.

En la Figura 6.4 se observa el ajuste de una curva de Gompertz para los datos reportados por el SIMAT del dióxido de nitrógeno (NO₂). El ajuste se realiza con el programa MINITAB:

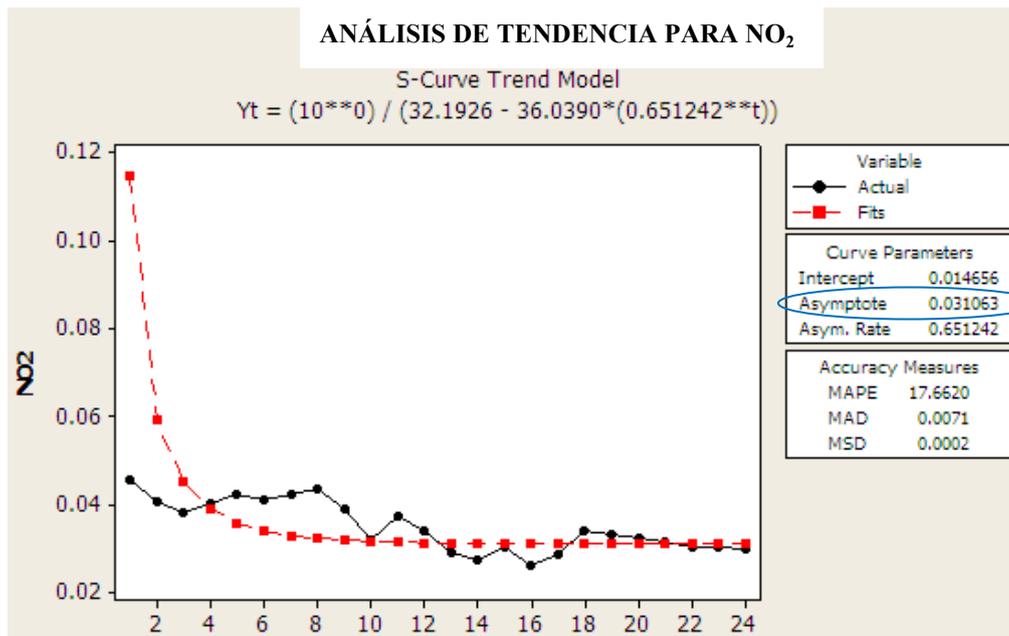


Figura 6.4

En este componente, la asíntota que MINITAB calcula es la adecuada cuando t tiende a $+\infty$, por lo que, el análisis de tendencia a largo plazo, indica que va a estar alrededor de 0.031063. En México la Norma Oficial Mexicana (ver capítulo 2) establece un límite máximo permisible de 0.210 ppm promedio horario, la cual no debe excederse más de una hora al año. El límite máximo anterior no es directamente comparable con los resultados de la figura 6.4, se acudió a la OMS para obtener un valor que se pueda comparar directamente, y se encontró, que el límite máximo permisible es de 0.021 ppm para el promedio anual, por lo que este componente, se puede decir, que está arriba de lo establecido y se concluye que se encuentra **fuera de control**.

Como se puede ver, el resultado obtenido para el NO₂, advierte riesgos de salud, por lo que, en la siguiente sección, se intentará ajustar un modelo ARIMA a la serie de tiempo correspondiente para tratar de tener un modelo con el cual hacer pronósticos a corto plazo (tres meses). Se ajustará el modelo con todos los datos disponibles, excepto los valores de los últimos tres meses, pensando en utilizar esta información (últimos tres meses) para validar el modelo ajustado.

En la Figura 6.5 se observa el ajuste de una curva de Gompertz para los datos reportados por el SIMAT de las partículas PM10. El ajuste se realiza con el programa MINITAB:

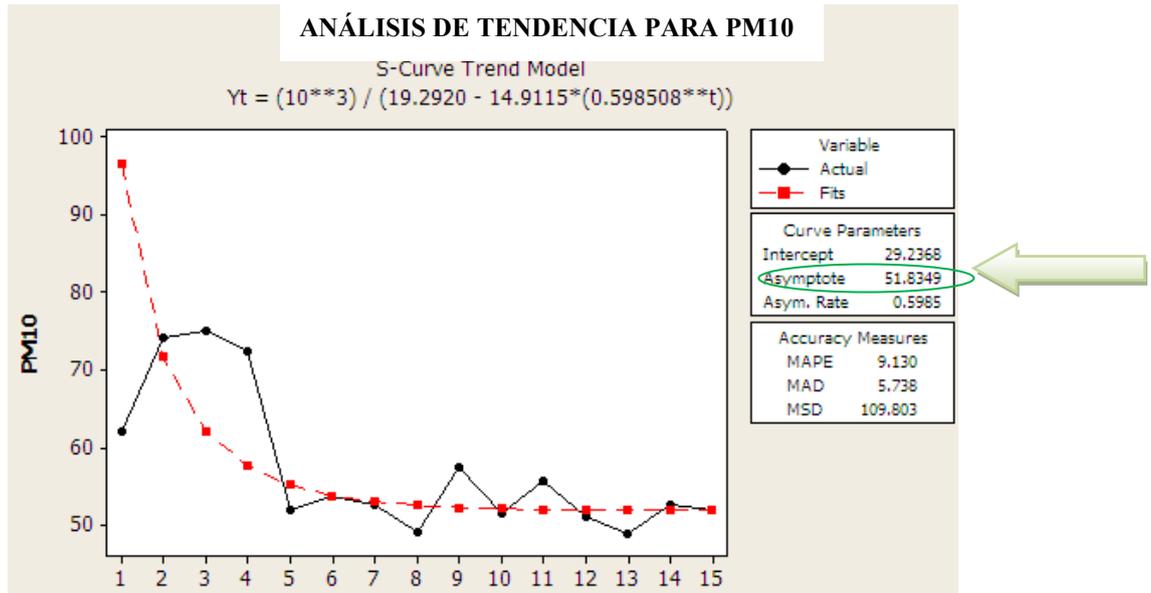


Figura 6.5

En el contaminante PM 10 el límite máximo permisible según la Norma Oficial Mexicana (ver capítulo 2) es de una concentración de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ media aritmética anual. La asíntota es de 51.8349 y MINITAB la calculó adecuadamente cuando t tiende a $+\infty$, por lo que, el análisis de tendencia a largo plazo, indica que se va a estabilizar en 51.8349. Comparando con el límite máximo se puede concluir que se encuentra por encima de la media aritmética anual. El componente está **fuera de control**.

Como se puede ver estos resultados advierten riesgos de salud, por lo que, se ajustará en la siguiente sección, un modelo ARIMA a la serie de tiempo correspondiente para tratar de tener un modelo con el cual hacer pronósticos a corto plazo (tres meses). Se ajustará el modelo con todos los datos disponibles, excepto los valores de los últimos tres meses, pensando en usar esta información para poner a prueba el modelo.

Finalmente la Figura 6.6 se observa el ajuste de una curva de Gompertz para los datos reportados por el SIMAT de las partículas PM2.5. El ajuste se realiza con el programa MINITAB:

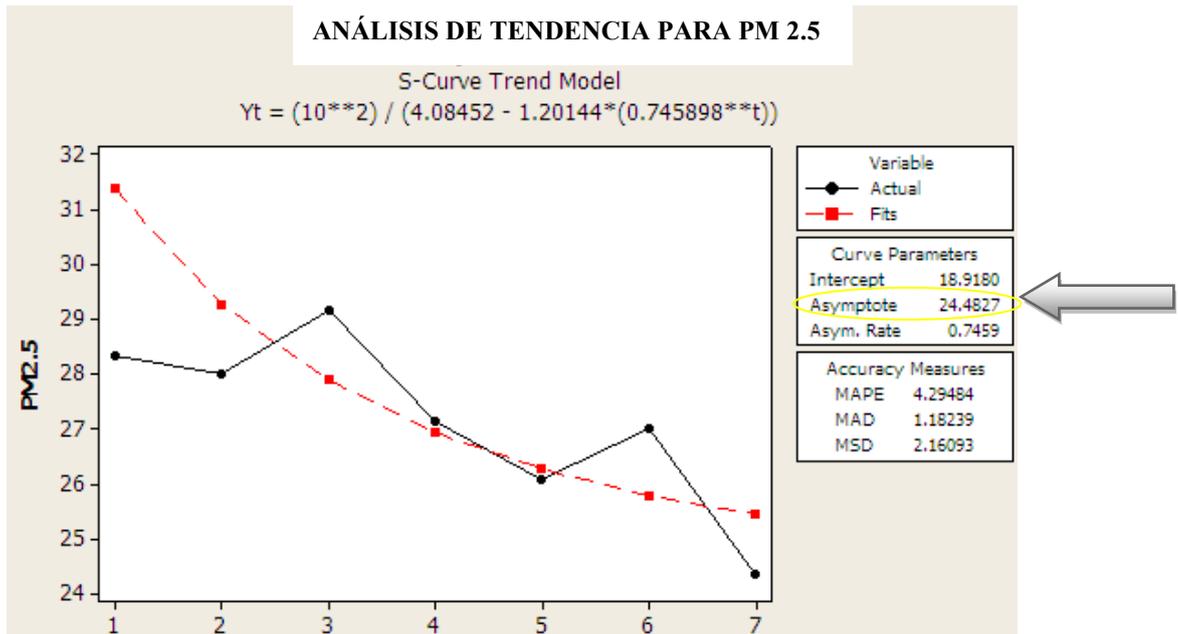


Figura 6.6

En el contaminante PM 2.5 el límite máximo permisible según la Norma es de una concentración de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ media aritmética anual. La asíntota es de 24.4827 ha sido correctamente calculada por MINITAB cuando t tiende a $+\infty$, por lo que, el análisis de tendencia a largo plazo, indica que se va a estabilizar en 24.4827, comparando con el límite máximo se observa que se encuentra muy por encima de la media aritmética anual. El contaminante se encuentra **fuera de control**.

Como se puede ver estos resultados advierten riesgos de salud, por lo que, se intentará en la siguiente sección ajustar un modelo ARIMA a la serie de tiempo correspondiente para tratar de tener un modelo con el cual hacer pronósticos a corto plazo (tres meses).

Se ajustará el modelo con todos los datos disponibles, excepto los valores de los últimos tres meses, pensando en usar esta información para poner a prueba el modelo.

6.2 Modelos ARIMA para componentes fuera de control

Según el estudio anterior se puede decir que los componentes que se encuentran fuera de control son el NO_2 , las partículas PM_{10} y las partículas $\text{PM}_{2.5}$, por lo que se les ajustará un modelo ARIMA para saber su tendencia a corto plazo.

6.2.1 Modelo ARIMA para el NO₂

En la figura 3.2 del capítulo 3 se puede observar la serie de tiempo completa para el NO₂.

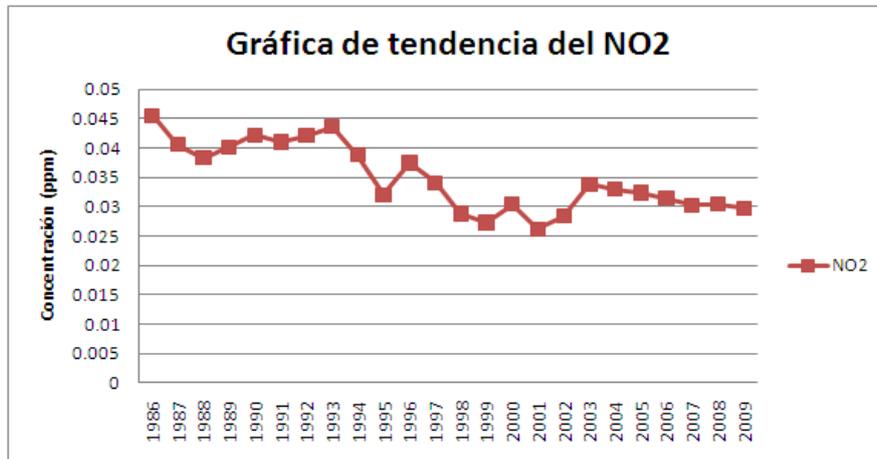


Figura 3.2 del capítulo 3

Es importante mencionar que se tomaron datos semanales del componente NO₂ del año 2003 al 2009 ya que la información de años anteriores es muy diferente a lo actual por lo que es preferible no incluirlo. Para el ajuste del modelo, comenzaremos revisando la función de auto-correlación, la cual se muestra en la Figura 6.7:

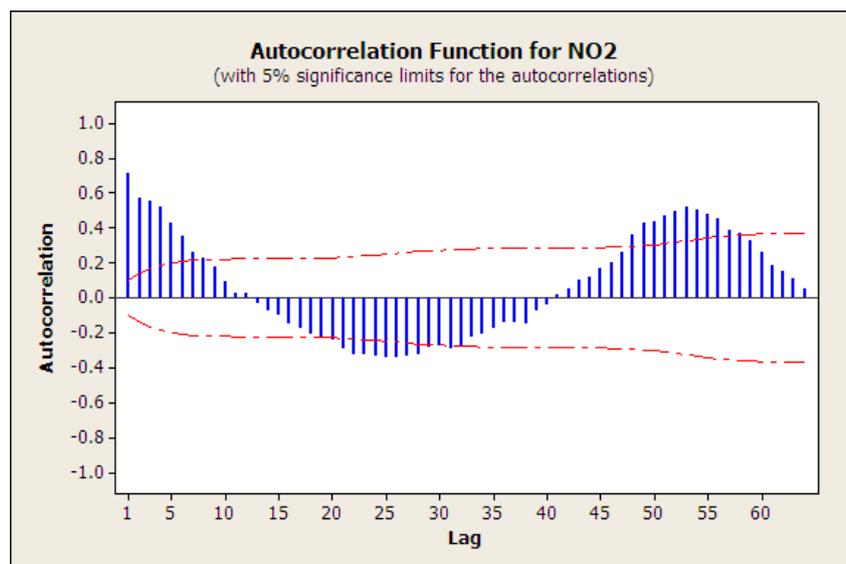


Figura 6.7

En esta, se aprecia que la serie es no estacionaria y no se ven ciclos estacionales definidos. Para tratar de transformarla en una serie estacionaria, se le calcula una primera diferencia. La función de auto-correlación de la primera diferencia se puede apreciar en la Figura 6.8:

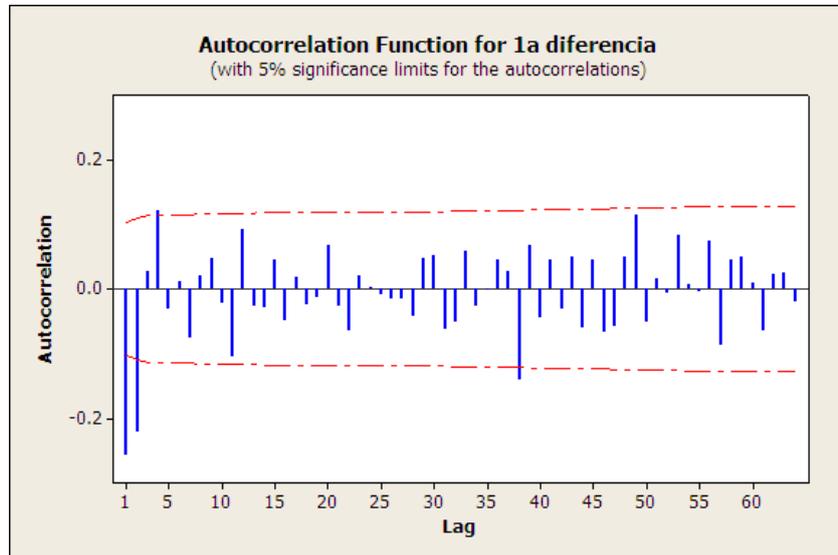


Figura 6.8

En esta se observa que una sola diferencia fue suficiente para lograr la estacionariedad.

De la forma que tiene la función de auto-correlación de la primera diferencia, se podría proponer un modelo MA (2) para la serie, pues sólo tiene las dos primeras auto-correlaciones significativamente distintas de cero, sin embargo, recordando que es preferible un modelo AR sobre un modelo MA, ya que un modelo AR nos da mayor certeza de que los valores obtenidos son realmente un óptimo, se observa la gráfica de la función de auto-correlación parcial de la primera diferencia (Figura 6.9) y ésta sugiere un modelo AR (3) o AR (2).

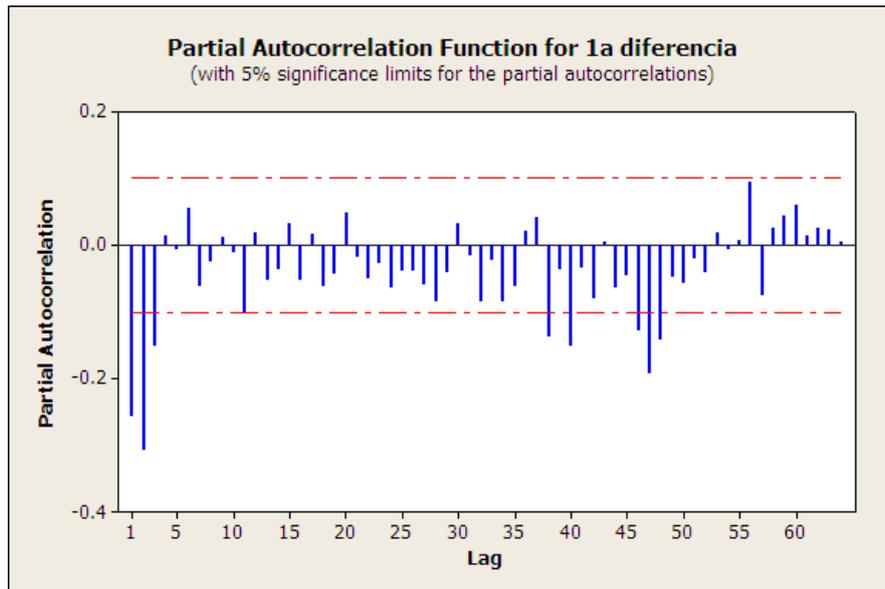


Figura 6.9

A continuación, en la Figura 6.10 se muestra la gráfica de la primera diferencia para el NO_2 :

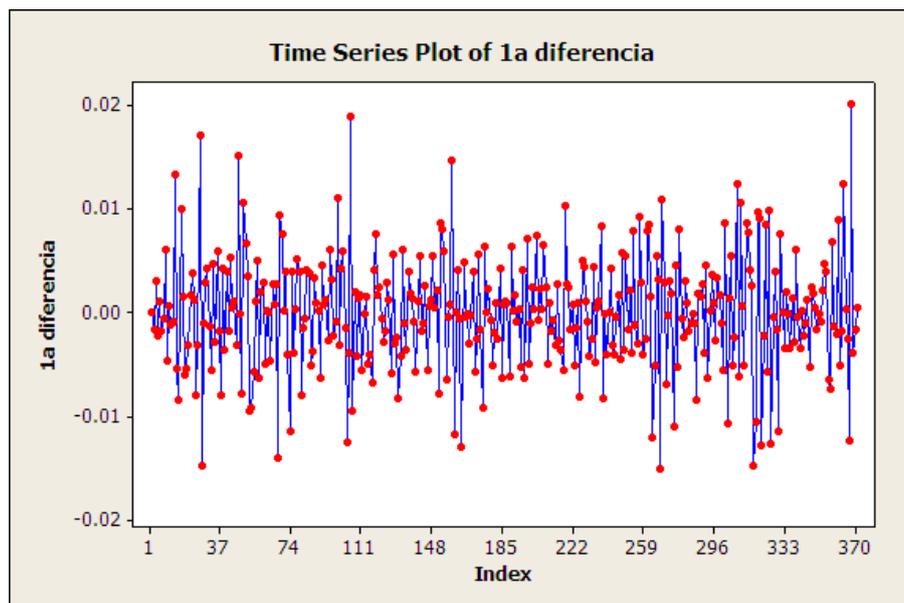


Figura 6.10

En esta gráfica se aprecia que, efectivamente, una sola diferencia basta para que no haya ni tendencia ni ciclos estacionales, está estable.

Ahora, se estimarán modelos AR (2), AR (3) y AR (4) para decidir cuál de estos es el mejor.

SELECCIÓN DEL MODELO PARA LA PRIMERA DIFERENCIA:

Se revisarán primero las estimaciones de los parámetros del modelo AR (2), estos se muestran en la Tabla 1:

AR(2)

Final Estimates of Parameters					
Type		Coef	SE Coef	T	P
AR	1	-0.2955	0.0550	-5.37	0.000
AR	2	-0.2747	0.0557	-4.94	0.000
Constant		0.0000119	0.0002872	0.04	0.967



Tabla 1

Para comparar la significancia estadística de los coeficientes se puede ver la última columna de esta tabla (valor P) y se concluye que los dos coeficientes son significativamente diferentes de cero con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

A continuación se muestra en la Tabla 2, los resultados del estadístico de Ljung-Box para el modelo AR (2), en donde se observa, que no hay evidencia en contra del supuesto del modelo sobre las auto-correlaciones del error, que por ser ruido blanco, deberían ser todas cero para cualquier retraso. Se puede apreciar que (ver último renglón de la Tabla 2) con este estadístico, aún en retrasos grandes para el modelo AR (2), no hay evidencia en contra de las hipótesis de que las auto-correlaciones son todas cero.

Modified Box-Pierce (Ljung-Box) Chi-Square statistic				
Lag	12	24	36	48
Chi-Square	14.3	17.8	23.2	43.2
DF	9	21	33	45
P-Value	0.114	0.664	0.899	0.547

Tabla 2

Se optará por comparar con un modelo AR (3), para el cual las estimaciones de los coeficientes se muestran en la siguiente tabla:

AR(3)

Final Estimates of Parameters					
Type		Coef	SE Coef	T	P
AR	1	-0.3336	0.0567	-5.88	0.000
AR	2	-0.3191	0.0581	-5.49	0.000
AR	3	-0.1411	0.0574	-2.46	0.015
Constant		0.0000235	0.0002850	0.08	0.934



Tabla 3

En la Tabla 3, se puede ver que los tres coeficientes difieren significativamente de cero con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

A continuación se muestra en la Tabla 4, que la prueba de Ljung-Box no presenta evidencia en contra del supuesto del modelo sobre las auto-correlaciones del error para el modelo AR (3).

Modified Box-Pierce (Ljung-Box) Chi-Square statistic				
Lag	12	24	36	48
Chi-Square	7.8	12.5	18.5	36.8
DF	8	20	32	44
P-Value	0.451	0.899	0.973	0.770

Tabla 4

Se revisarán también resultados para el modelo AR (4).

AR(4)

Final Estimates of Parameters					
Type		Coef	SE Coef	T	P
AR	1	-0.3319	0.0573	-5.79	0.000
AR	2	-0.3152	0.0609	-5.17	0.000
AR	3	-0.1366	0.0610	-2.24	0.026
AR	4	0.0126	0.0581	0.22	0.829
Constant		0.0000223	0.0002854	0.08	0.938



Tabla 5

En la Tabla 5 se ve que el cuarto coeficiente no difiere significativamente de cero, por lo que se puede concluir que la serie no requiere un cuarto parámetro.

Finalmente, revisando los resultados anteriores, se decide seleccionar el modelo **AR (3)** pues es posible que el modelo AR (2) sea un modelo incompleto ya que los tres coeficientes del modelo AR (3) difieren significativamente de cero.

En la Figura 6.11 se puede apreciar la serie completa del NO_2 , en esta se comparan los pronósticos del modelo AR (3) con el pronóstico de los últimos tres meses:

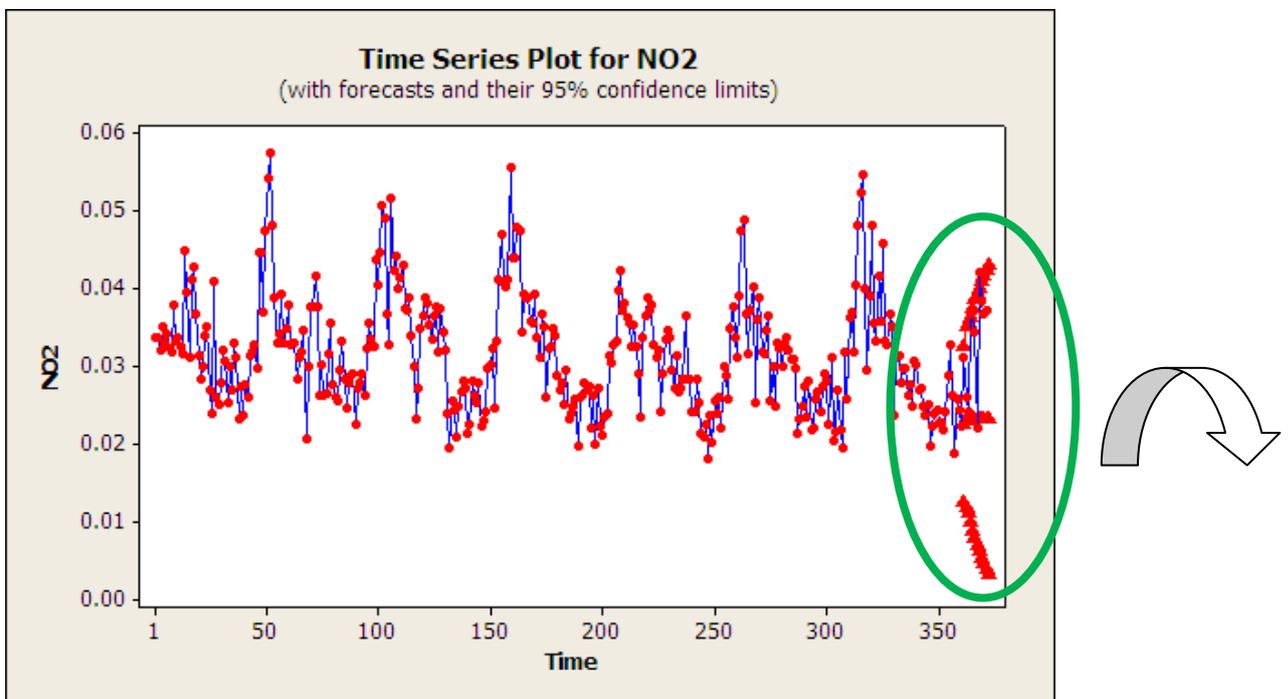


Figura 6.11

A continuación, la gráfica de la Figura 6.12, nos muestra un acercamiento de la gráfica de la Figura 6.11 donde se aprecia con mayor claridad el pronóstico de los últimos tres meses.

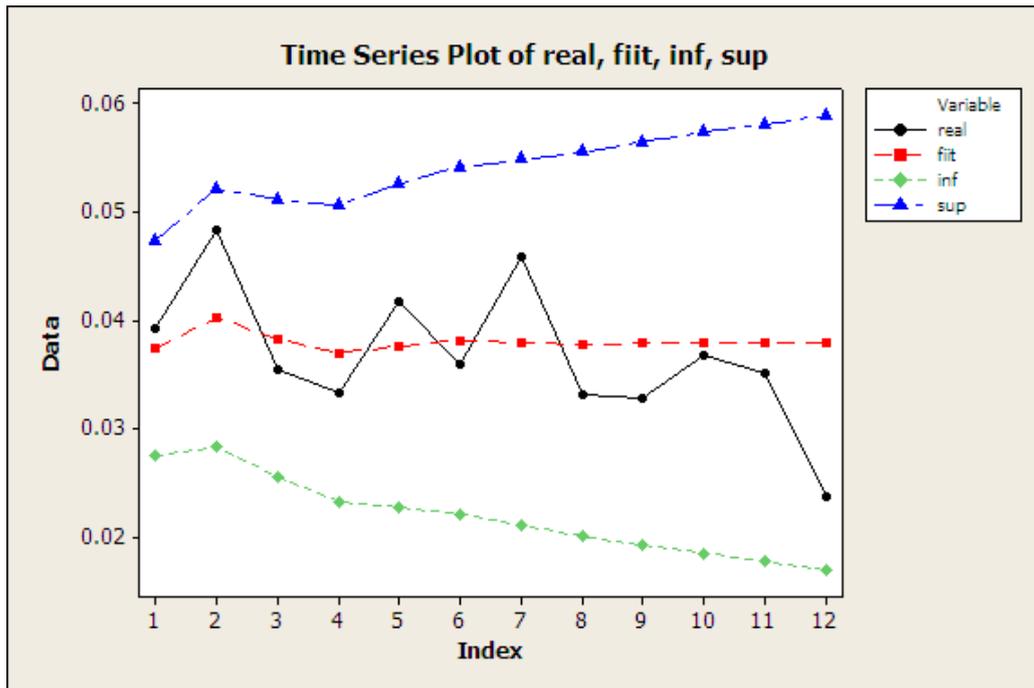


Figura 6.12

Se puede decir, que el modelo opera adecuadamente, pues cubre, dentro de la banda de 95% de confianza los valores observados los últimos tres meses (12 semanas). Además no hay diferencias considerables entre lo observado y el pronóstico.

La gráfica de la función de auto-correlación (ver Figura 6.8) muestra que un posible modelo para la serie de la primera diferencia del NO₂ puede ser el MA (2). Se estimará a continuación un modelo MA (2) para los datos, con la idea de comparar ambos modelos, AR (3) vs MA (2).

El criterio del MSD menor nos ayudará a decidir cuál es mejor.

MA(2)

Final Estimates of Parameters				
Type	Coef	SE Coef	T	P
MA 1	0.3223	0.0558	5.78	0.000
MA 2	0.1857	0.0558	3.33	0.001
Constant	0.0000136	0.0001411	0.10	0.923



Tabla 6

En la Tabla 6, se puede ver que los dos coeficientes son significativamente diferentes de cero con un nivel de significancia de $\alpha= 0.05$.

A continuación se muestra en la Tabla 7 que no hay evidencia en contra del supuesto del modelo sobre las auto-correlaciones del error:

	Modified Box-Pierce	(Ljung-Box)	Chi-Square	statistic
Lag	12	24	36	48
Chi-Square	11.7	16.8	22.7	39.5
DF	9	21	33	45
P-Value	0.230	0.723	0.910	0.703

Tabla 7

Abajo se muestra, en la gráfica de la Figura 6.13, los pronósticos del modelo MA (2) ajustado comparados con lo observado en los últimos tres meses. De igual manera que para el AR (3), el modelo MA (2) opera adecuadamente, pues cubre, dentro de la banda de 95% de confianza los valores observados los últimos tres meses (12 semanas), además no hay diferencias considerables entre lo observado y el pronóstico.

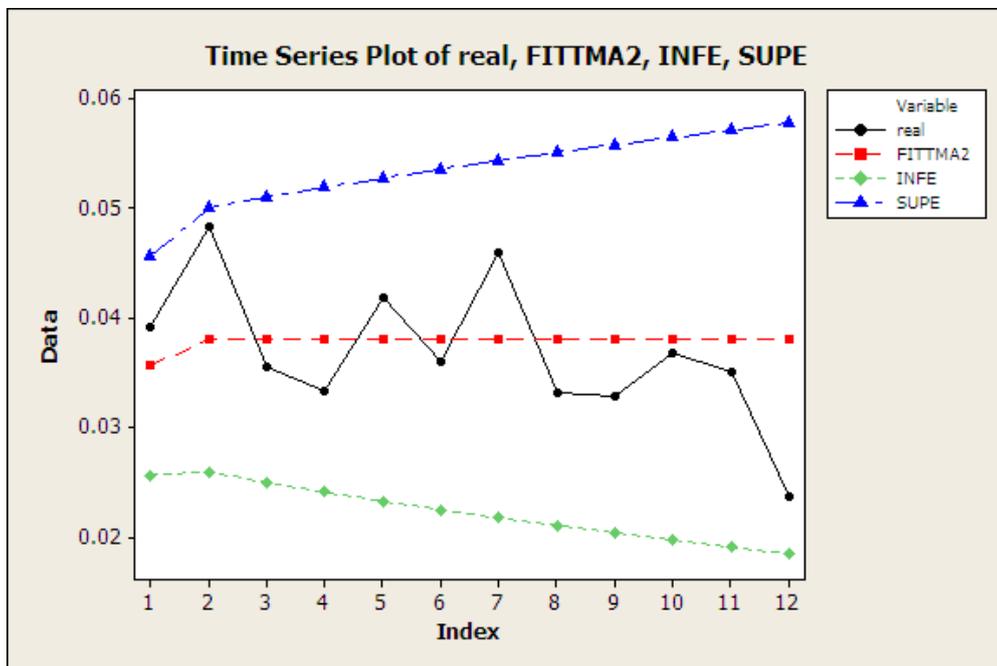


Figura 6.13

Al calcular los cuadrados medios de las diferencias (MSD) para ambos modelos se tiene que:

MSD para el AR(3) = 3.61158E-05

MSD para el MA(2) = 4.15911E-05

No hay diferencia muy notoria, pero el MSD del AR (3) es menor que el MSD del MA (2).

Entonces, puesto que el AR (3) está más cerca, en promedio, de los valores que el MA (2) y existe más certeza en su proceso de estimación, se opta por elegir el modelo **AR (3)**.

Análisis de residuales.

Anteriormente, la prueba de Ljung-Box mostró que no hay evidencia contra el supuesto de que el término de error es un proceso aleatorio. Se revisarán ahora aspectos adicionales sobre los residuales del modelo elegido AR (3).

La gráfica de auto-correlación de los residuales del modelo estimado AR (3) se muestra en la figura 6.14:

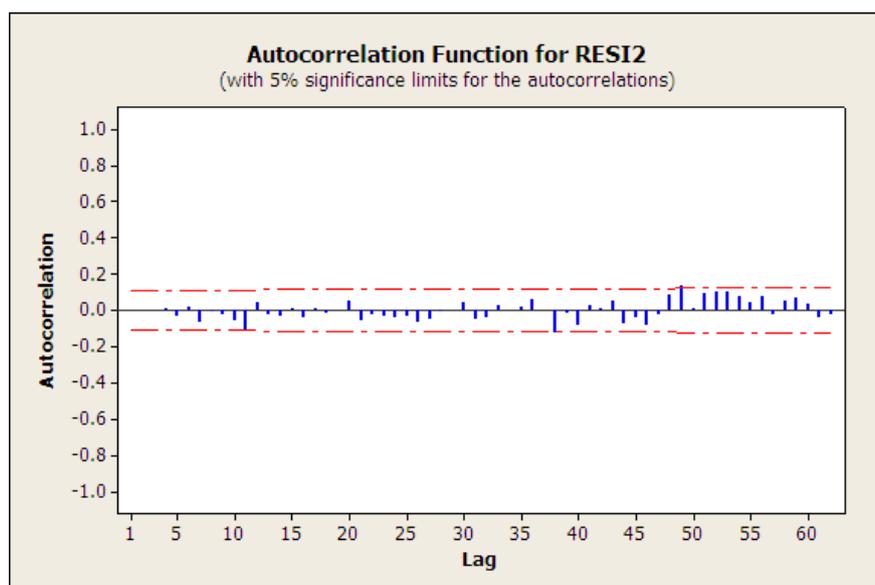


Figura 6.14

Los residuales, se puede afirmar, son valores aleatorios independientes. Además, se observan fluctuando sobre el cero, (ver Figura 6.15) lo cual es consistente con la hipótesis de los modelos ARIMA, que especifican que los términos de error tienen media cero.

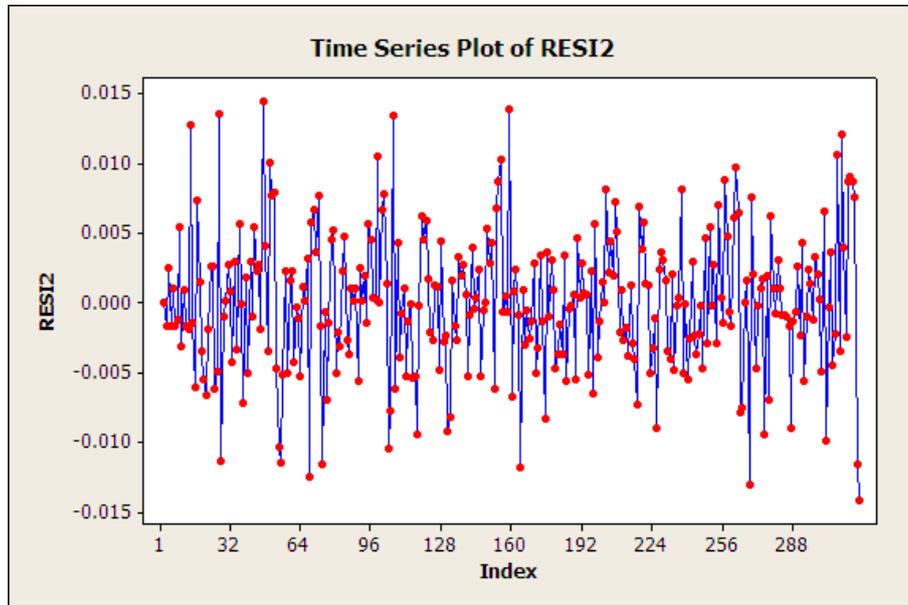


Figura 6.15

Esta gráfica tiene la forma esperada, no hay evidencia entonces contra los supuestos del modelo. Se puede considerar el modelo ARIMA (3,1,0) una buena opción para construir pronósticos para la serie de tiempo del componente NO₂ del IMECA.

6.2.2 Modelo ARIMA para el componente PM10

En la figura 3.6 del capítulo 3, se puede observar la serie de tiempo completa para las partículas PM10:

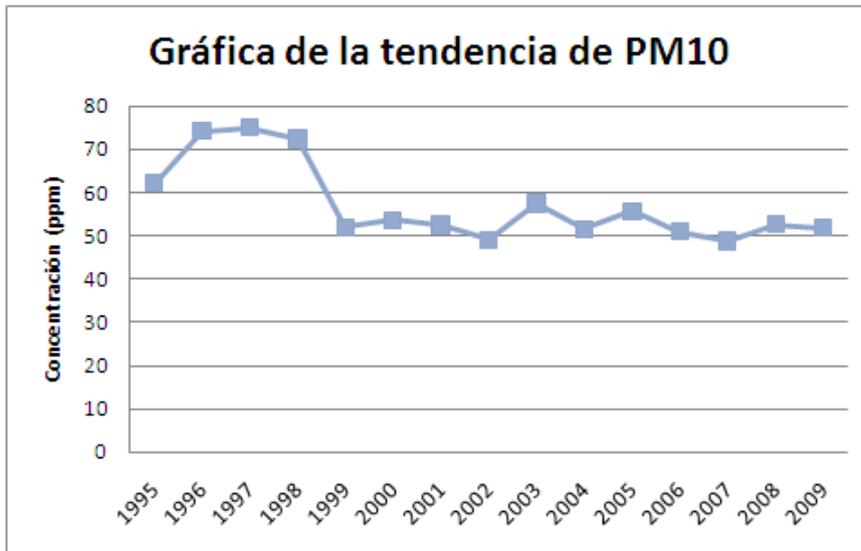


Figura 3.6 del capítulo 3

Se tomaron datos semanales que abarcan desde el año 1995 hasta el 2009. En esa gráfica no se ven ciclos estacionales definidos. Para el ajuste del modelo, se observa en la Figura 6.16 la función de auto-correlación:

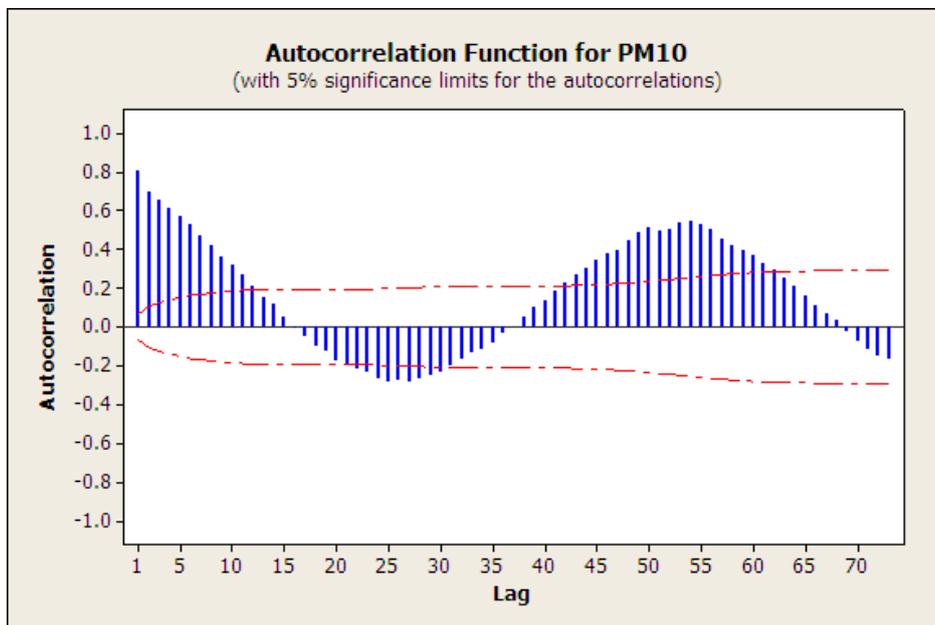


Figura 6.16

En esta se puede apreciar que la serie es no estacionaria. Para tratar de transformarla en una serie estacionaria, se ensaya con la primera diferencia de la serie. La función de auto-correlación de la primera diferencia se ve en la Figura 6.17:

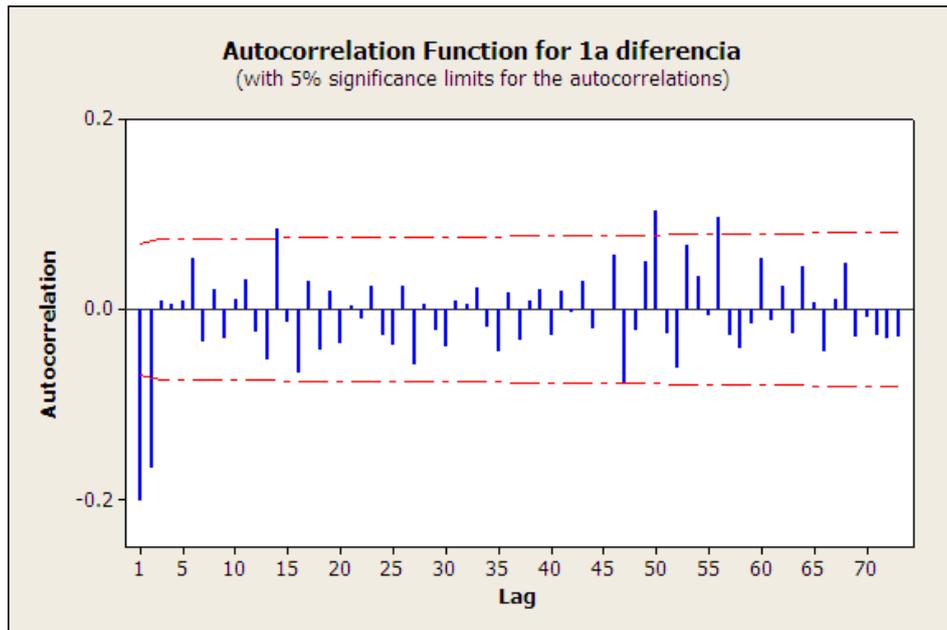


Figura 6.17

Se puede observar, que una sola diferencia fue suficiente para lograr la estacionariedad.

Con la forma que presenta la función de auto-correlación de la primera diferencia, se podría proponer un modelo MA (2), pues sólo las dos primeras auto-correlaciones difieren significativamente de cero, al nivel 0.05. Sin embargo, recordando que es preferible un modelo AR sobre un modelo MA, observamos la gráfica de la función de auto-correlación parcial de la primera diferencia (ver Figura 6.18) y ésta sugiere un modelo AR (3) o AR (2), pues se ve que sólo las primeras dos o tal vez tres auto-correlaciones parciales difieren significativamente de cero.

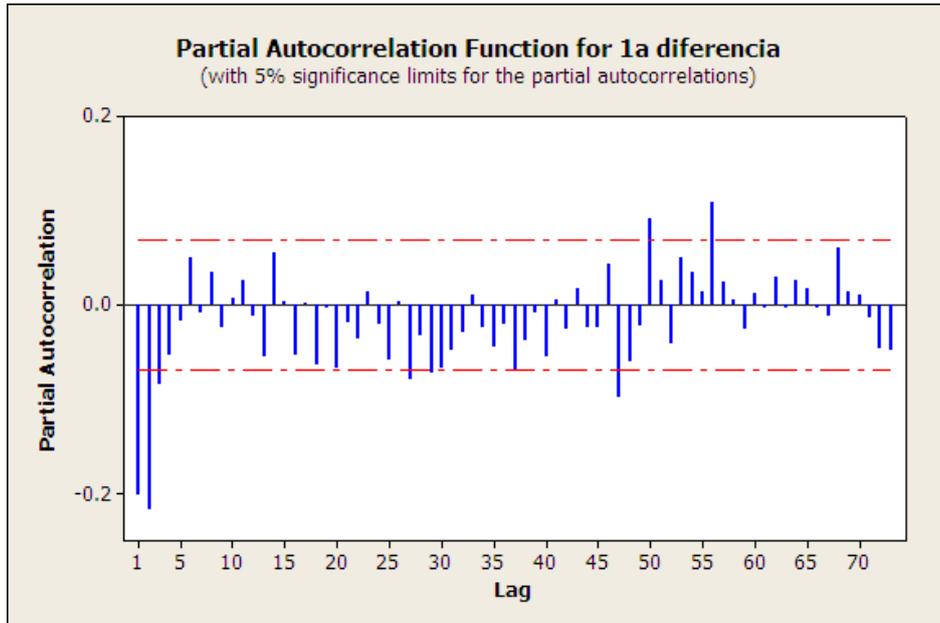


Figura 6.18

En la Figura 6.19 se muestra la gráfica de la primera diferencia para las partículas PM10:

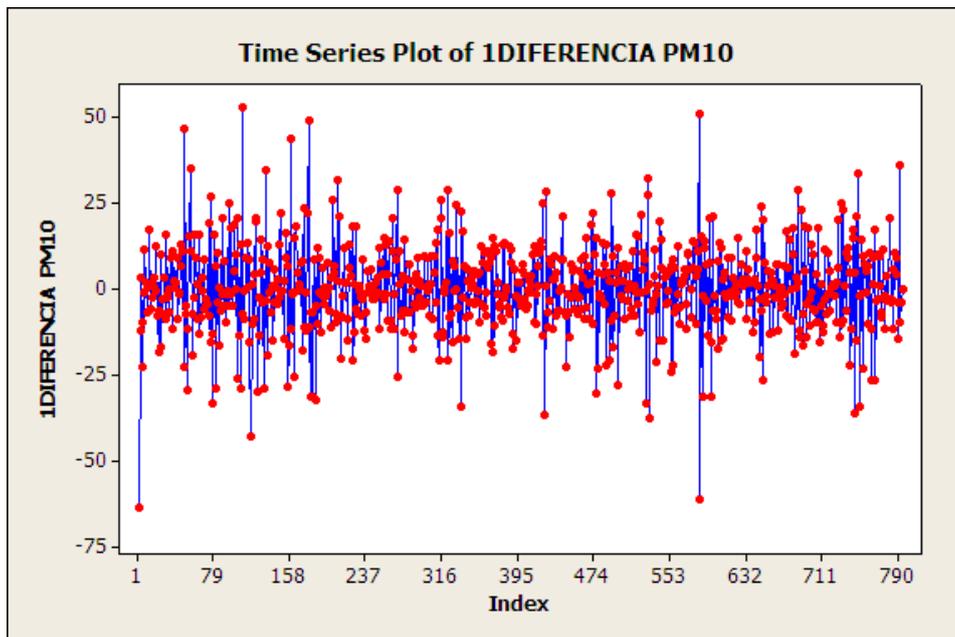


Figura 6.19

En esta gráfica, se confirma que con una sola diferencia no hay tendencia ni ciclos estacionales, está estable.

Ahora, se estimarán modelos AR (2), AR (3) y hasta AR (4) para decidir cuál de estos es el mejor.

SELECCIÓN DEL MODELO PARA LA PRIMERA DIFERENCIA:

La tabla 8 presenta los resultados asociados con las estimaciones de los parámetros del modelo AR (2):

AR(2)

Final Estimates of Parameters					
Type		Coef	SE Coef	T	P
AR	1	-0.2323	0.0359	-6.47	0.000
AR	2	-0.2163	0.0360	-6.01	0.000
Constant		-0.1542	0.4505	-0.34	0.732



Tabla 8

Para comprobar la significancia estadística de los coeficientes, se puede ver, en la última columna (valor P), que los dos coeficientes son significativamente diferentes de cero con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

A continuación se muestra en la Tabla 9 que no hay evidencia en contra del supuesto del modelo sobre las auto-correlaciones del error, aún en retrasos grandes como 48.

Modified Box-Pierce (Ljung-Box) Chi-Square statistic				
Lag	12	24	36	48
Chi-Square	15.6	27.4	40.2	46.1
DF	9	21	33	45
P-Value	0.077	0.160	0.182	0.425

Tabla 9

Los correspondientes parámetros estimados para un modelo AR (3) se presentan en la Tabla 10.

AR(3)

Final Estimates of Parameters					
Type		Coef	SE Coef	T	P
AR	1	-0.2519	0.0367	-6.87	0.000
AR	2	-0.2383	0.0369	-6.47	0.000
AR	3	-0.0911	0.0367	-2.48	0.013
Constant		-0.1555	0.4488	-0.35	0.729



Tabla 10

Se puede ver que los tres coeficientes difieren significativamente de cero con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

A continuación se muestra en la Tabla 11 que no hay evidencia en contra del supuesto del modelo sobre las auto-correlaciones del error:

Modified Box-Pierce (Ljung-Box) Chi-Square statistic				
Lag	12	24	36	48
Chi-Square	9.6	23.1	39.1	44.8
DF	8	20	32	44
P-Value	0.296	0.284	0.181	0.438

Tabla 11

Las estimaciones del modelo AR (4) se presentan en la Tabla 12

AR(4)

Final Estimates of Parameters					
Type		Coef	SE Coef	T	P
AR	1	-0.2573	0.0368	-7.00	0.000
AR	2	-0.2517	0.0378	-6.65	0.000
AR	3	-0.1057	0.0378	-2.79	0.005
AR	4	-0.0559	0.0368	-1.52	0.129
Constant		-0.1561	0.4483	-0.35	0.728

Tabla 12

Se puede ver que la cuarta constante no difiere significativamente de cero, por lo que se puede concluir que la serie no requiere una cuarta constante.

Finalmente se decide seleccionar el modelo **AR (3)** pues los tres coeficientes difieren significativamente de cero y el modelo AR (2) podría ser incompleto.

En la Figura 6.20 se puede apreciar la serie completa de las partículas PM10, en esta se comparan los pronósticos del modelo AR (3) con el pronóstico de los últimos tres meses:

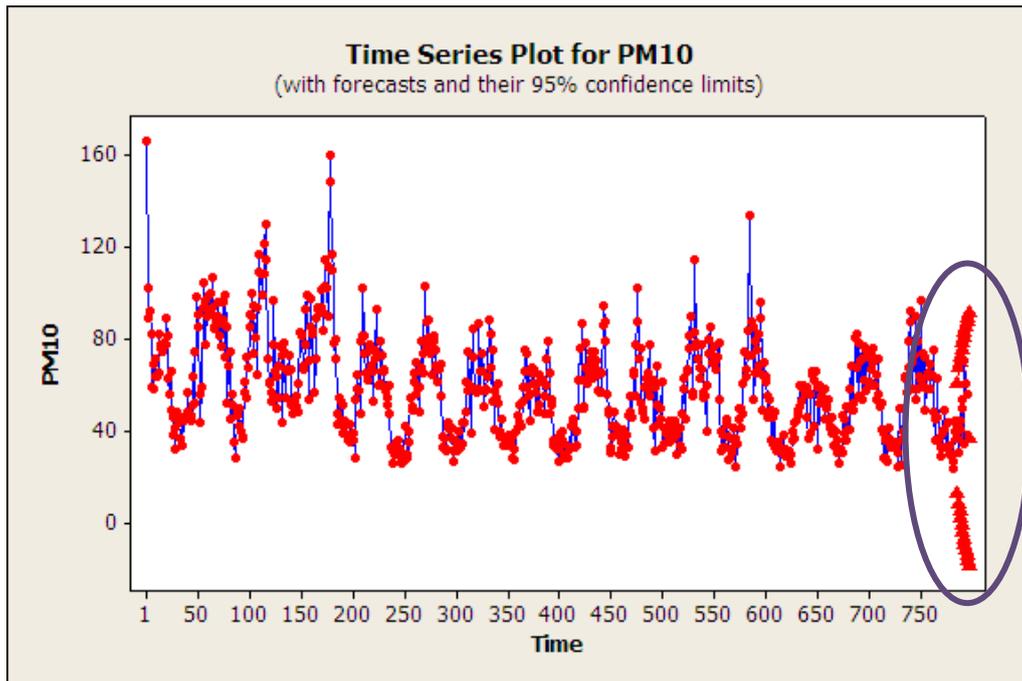


Figura 6.20

Abajo se muestra un acercamiento de la gráfica de la Figura 6.20. (Ver Figura 6.21)

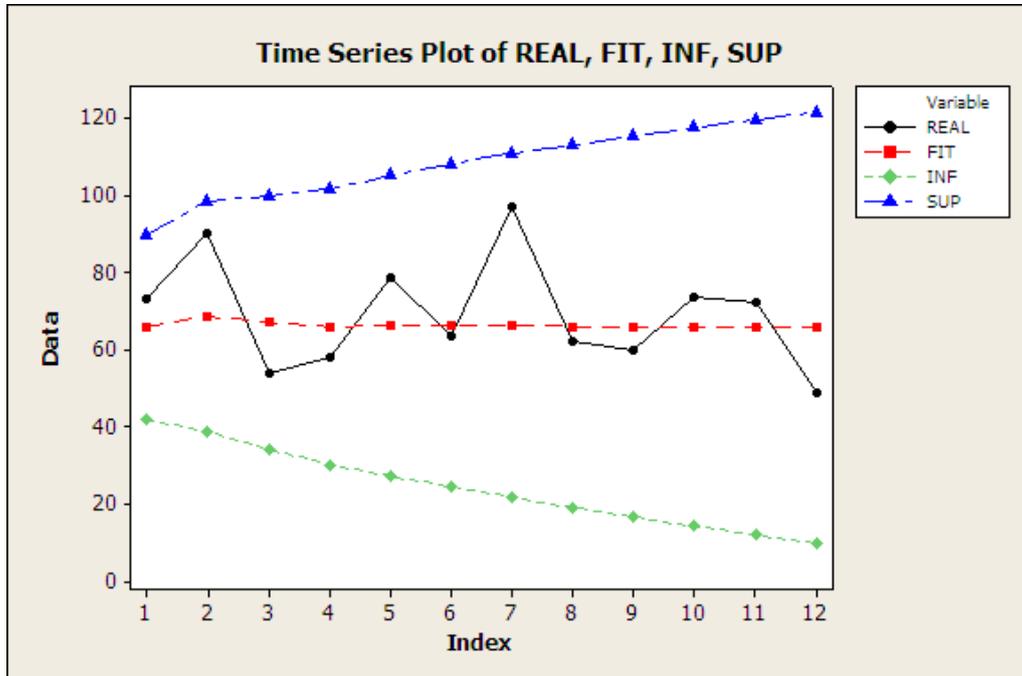


Figura 6.21

Se puede decir, que el modelo opera adecuadamente, pues cubre, dentro de la banda de 95% de confianza los valores observados los últimos tres meses (12 semanas). Además no hay diferencias considerables entre lo observado y el pronóstico.

Se estimará un modelo MA (2) para los datos, con la idea de comparar ambos modelos, el modelo AR (3) y el modelo MA (2). Esto se hace porque según la función de auto-correlación de la primera diferencia (ver Figura 6.17) el modelo MA (2) puede ser una alternativa.

El criterio del MSD menor nos ayudará a corroborar cuál es mejor.

MA(2)

Final Estimates of Parameters					
Type		Coef	SE Coef	T	P
MA	1	0.2564	0.0361	7.10	0.000
MA	2	0.1783	0.0361	4.94	0.000
Constant		-0.0884	0.2531	-0.35	0.727



Tabla 13

En la Tabla 13 se puede ver que los dos coeficientes son significativamente diferentes de cero con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

A continuación se muestra en la Tabla 14 que no hay evidencia en contra del supuesto del modelo sobre las auto-correlaciones del error:

Modified Box-Pierce (Ljung-Box) Chi-Square statistic				
Lag	12	24	36	48
Chi-Square	8.7	25.4	45.1	51.0
DF	9	21	33	45
P-Value	0.464	0.232	0.078	0.250

Tabla 14

Abajo se muestra la gráfica de los pronósticos del modelo MA (2) ajustado junto con lo observado en los últimos tres meses. (Ver Figura 6.22). Se puede decir, que el modelo opera adecuadamente, pues cubre, dentro de la banda de 95% de confianza los valores

observados los últimos tres meses (12 semanas). Además no hay diferencias considerables entre lo observado y el pronóstico.

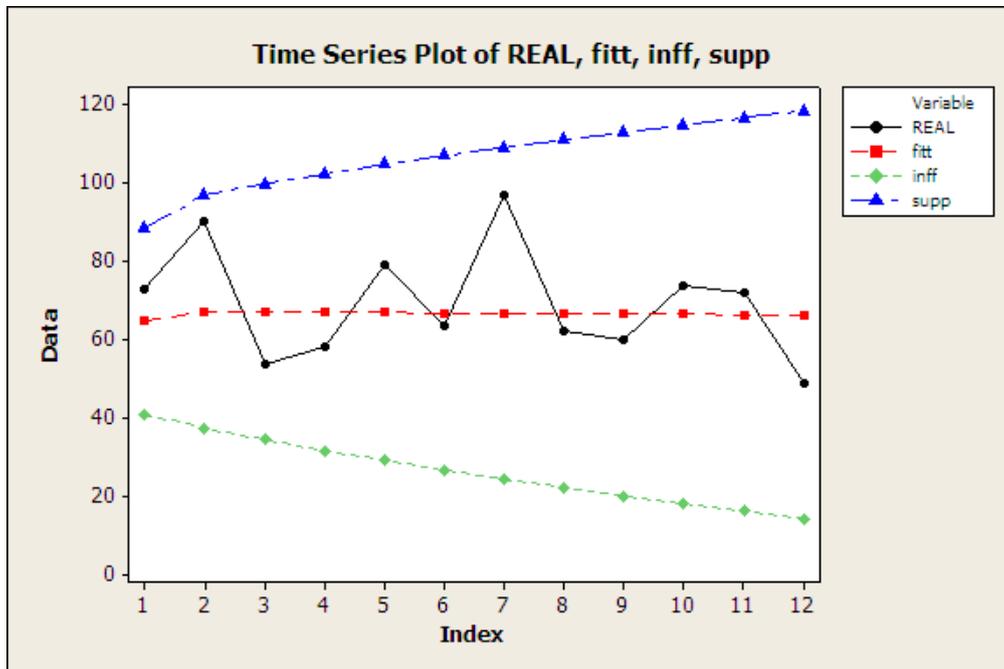


Figura 6.22

Al calcular los cuadrados medios de las diferencias (MSD) tenemos:

MSD para el AR(3) = 193.0785

MSD para el MA(2) = 197.2264

No hay diferencia muy notoria, pero el MSD del modelo AR (3) es menor que el MSD del modelo MA (2).

El AR (3) está, entonces, más cerca en promedio de los valores que el MA (2) y es más confiable su proceso de estimación, se decide elegir el modelo **AR (3)** para la serie de las primeras diferencias de la serie de tiempo de las partículas PM 10. Para hacer pronósticos en la serie de las partículas PM10 se usa, entonces, un modelo ARIMA (3,1,0).

Análisis de residuales.

Anteriormente, la prueba de Ljung-Box mostró que no hay evidencia contra el supuesto de que las auto-correlaciones del término de error son cero (son variables aleatorias independientes). Se revisarán ahora aspectos adicionales sobre los residuales del modelo elegido AR (3).

Para la validación del modelo se observa la gráfica de auto-correlación de los residuales del modelo estimado (AR(3)). (ver Figura 6.23)

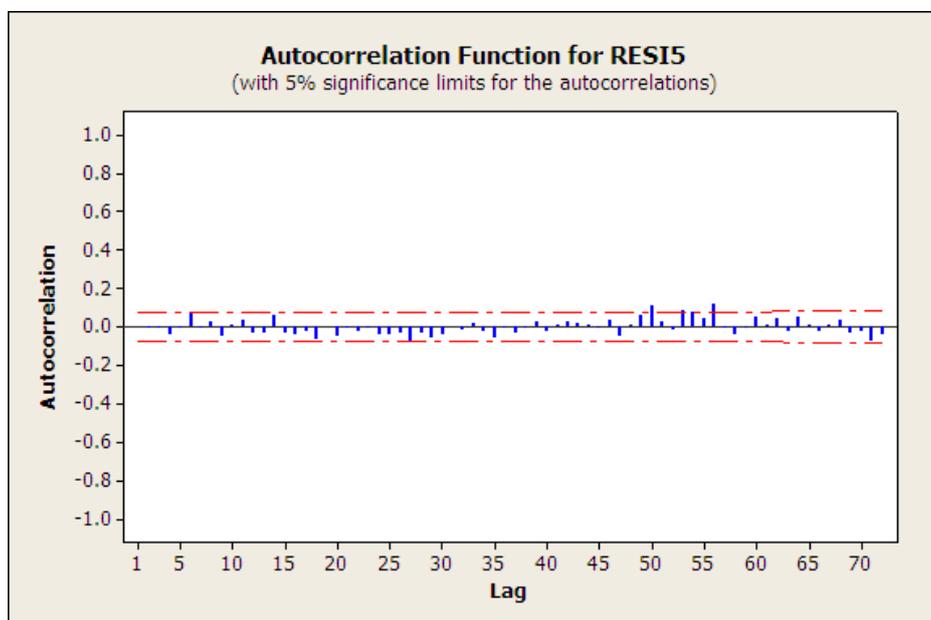


Figura 6.23

Los residuales son valores aleatorios independientes. Se observan fluctuando sobre el cero, lo cual es consistente con la hipótesis de los modelos ARIMA de que el término aleatorio tiene media cero.

En la Figura 6.24 se ve la gráfica de los residuales:

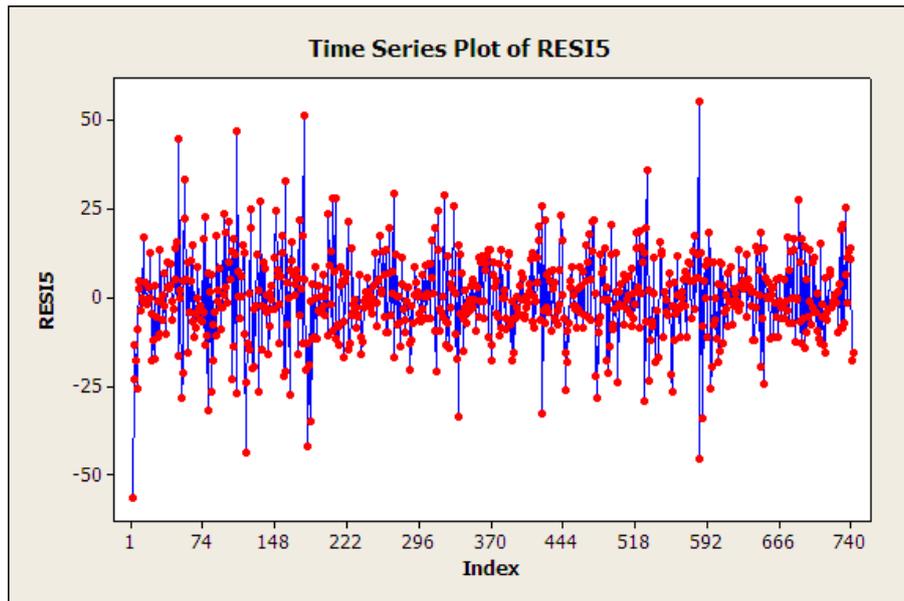


Figura 6.24

Esta gráfica tiene el modo esperado, no hay evidencias en contra de los supuestos del modelo. El modelo ARIMA (3,1,0) es una buena alternativa para hacer pronósticos en la serie de tiempo de las partículas PM10.

6.2.3 Modelo ARIMA para el componente PM2.5

En la figura 3.7 del capítulo 3, se puede observar la serie de tiempo completa para las partículas PM 2.5:

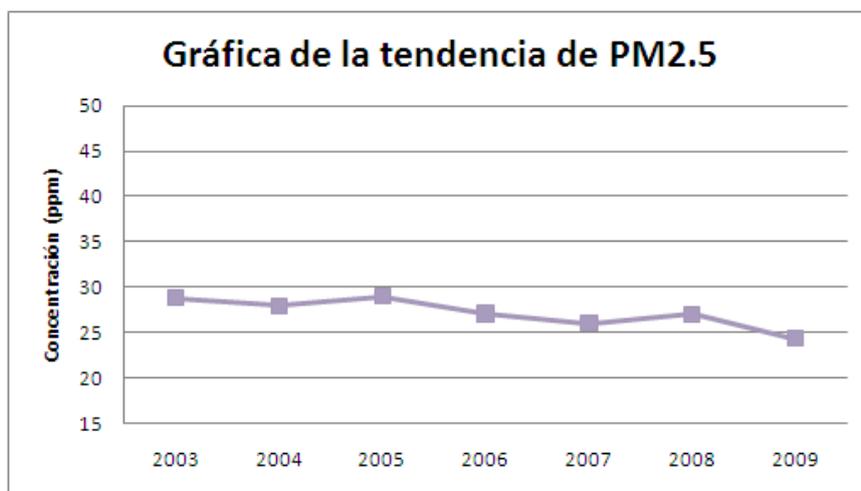


Figura 3.7 cap.3

Para el análisis se tomaron valores semanales desde el año 2003 hasta el 2009. La gráfica no muestra ciclos estacionales definidos. Para el ajuste del modelo, se observa en la Figura 6.25 la función de auto-correlación:

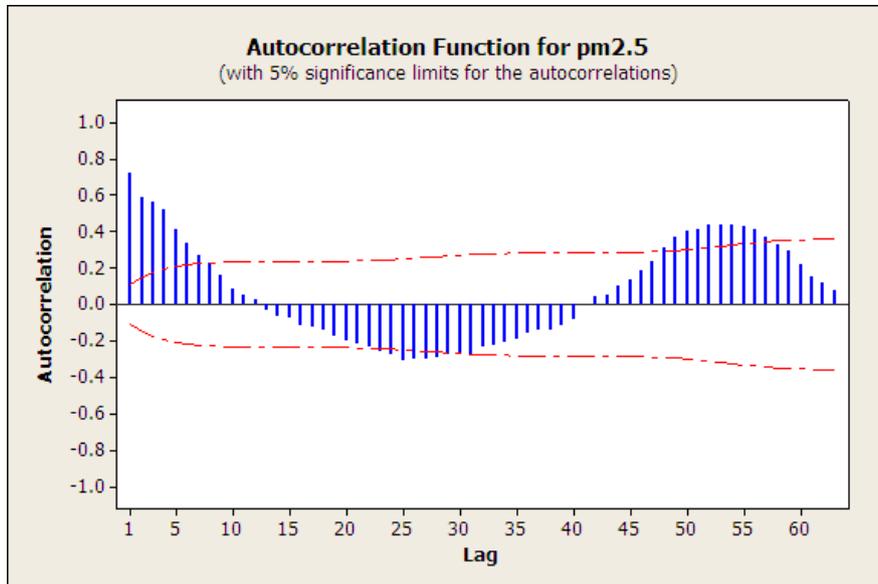


Figura 6.25

En esta gráfica observamos que la serie es no estacionaria. Para tratar de transformarla en una serie estacionaria, se ensaya con la primera diferencia de la serie. La función de auto-correlación de la primera diferencia se ve en la Figura 6.26:

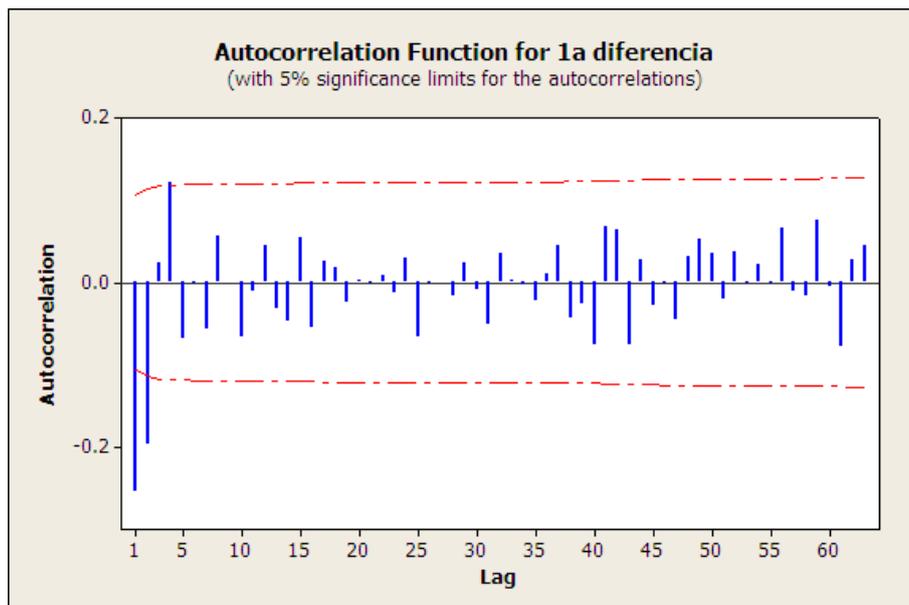


Figura 6.26

Se puede observar, que una sola diferencia fue suficiente para lograr la estacionariedad.

Con la forma que presenta la función de auto-correlación de la primera diferencia, se podría proponer un modelo MA (2), pues sólo las dos primeras auto-correlaciones difieren significativamente de cero, al nivel 0.05. Sin embargo, recordando que es preferible un modelo AR sobre un modelo MA, se observa la gráfica de la función de auto-correlación parcial de la primera diferencia en la Figura 6.27 y ésta sugiere un modelo AR (2) o AR (3) pues se observa que sólo las primeras dos o tal vez tres auto-correlaciones parciales difieren significativamente de cero.

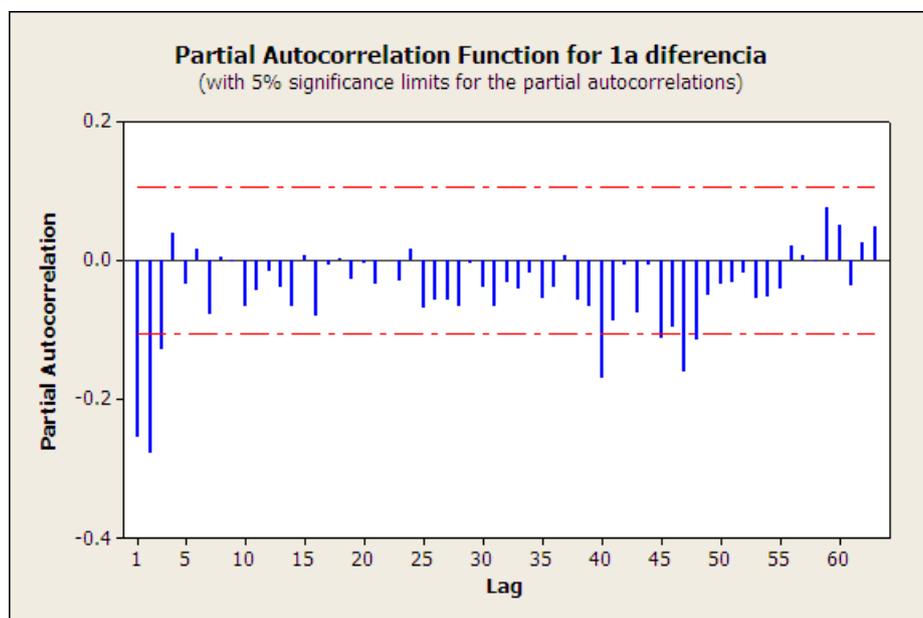


Figura 6.27

En la Figura 6.28 se muestra la gráfica de la primera diferencia para las partículas PM 2.5:

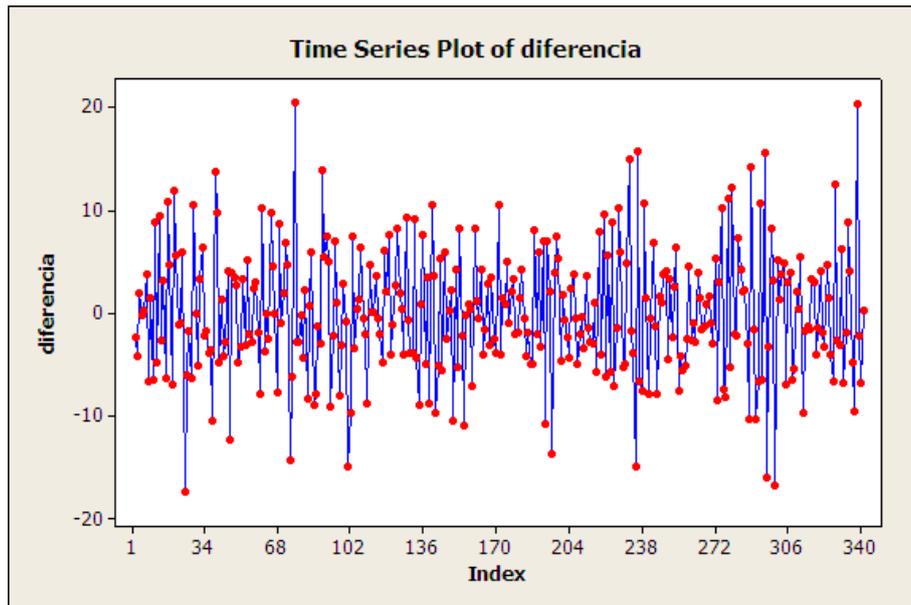


Figura 6.28

En esta gráfica, se confirma que con una sola diferencia no hay tendencia, ni ciclos estacionales, ni se observan cambios en la varianza de la serie.

Ahora, se estimarán modelos AR (2), AR (3) y hasta AR (4) para decidir cuál de estos es el mejor.

SELECCIÓN DEL MODELO PARA LA PRIMERA DIFERENCIA:

La Tabla 15 presenta los resultados asociados con las estimaciones de los parámetros del modelo AR (2):

AR(2)

Final Estimates of Parameters					
Type		Coef	SE Coef	T	P
AR	1	-0.2786	0.0581	-4.79	0.000
AR	2	-0.2289	0.0582	-3.93	0.000
Constant		0.0322	0.3367	0.10	0.924



Tabla 15

Para comprobar la significancia estadística de los coeficientes, se puede ver, en la última columna (valor P), que los dos coeficientes son significativamente diferentes de cero con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

A continuación se muestra en la Tabla 16, que no hay evidencia en contra del supuesto del modelo sobre las auto-correlaciones del error, aún en retrasos grandes como 48.

Modified Box-Pierce (Ljung-Box) Chi-Square statistic				
Lag	12	24	36	48
Chi-Square	9.4	16.7	20.8	41.0
DF	9	21	33	45
P-Value	0.403	0.731	0.951	0.642

Tabla 16

Los correspondientes parámetros estimados para un modelo AR (3) se presentan en la Tabla 17:

AR(3)

Final Estimates of Parameters					
Type		Coef	SE Coef	T	P
AR	1	-0.3025	0.0595	-5.09	0.000
AR	2	-0.2586	0.0603	-4.29	0.000
AR	3	-0.1057	0.0595	-1.78	0.077
Constant		0.0417	0.3354	0.12	0.901

Tabla 17

Se puede ver que la tercera constante no difiere significativamente de cero, por lo que se puede concluir que la serie no requiere una tercera constante.

Finalmente, se decide seleccionar el modelo **AR (2)** pues los dos coeficientes difieren significativamente de cero, un modelo menor como el AR (1) podría ser incompleto.

En la Figura 6.29 se puede apreciar la serie completa de las partículas PM 2.5, en esta se comparan los pronósticos del modelo AR (2) con el pronóstico de los últimos tres meses:

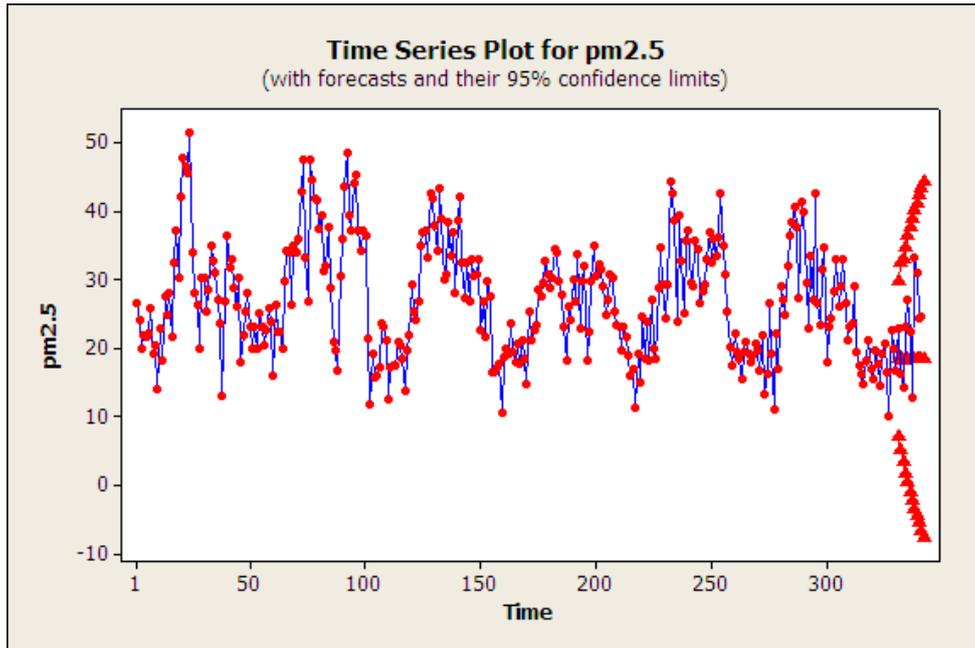


Figura 6.29

Abajo se muestra un acercamiento de la gráfica de la Figura 6.29 donde se aprecia mejor los pronósticos del modelo ajustado junto con lo observado en los últimos tres meses (ver Figura 6.30).

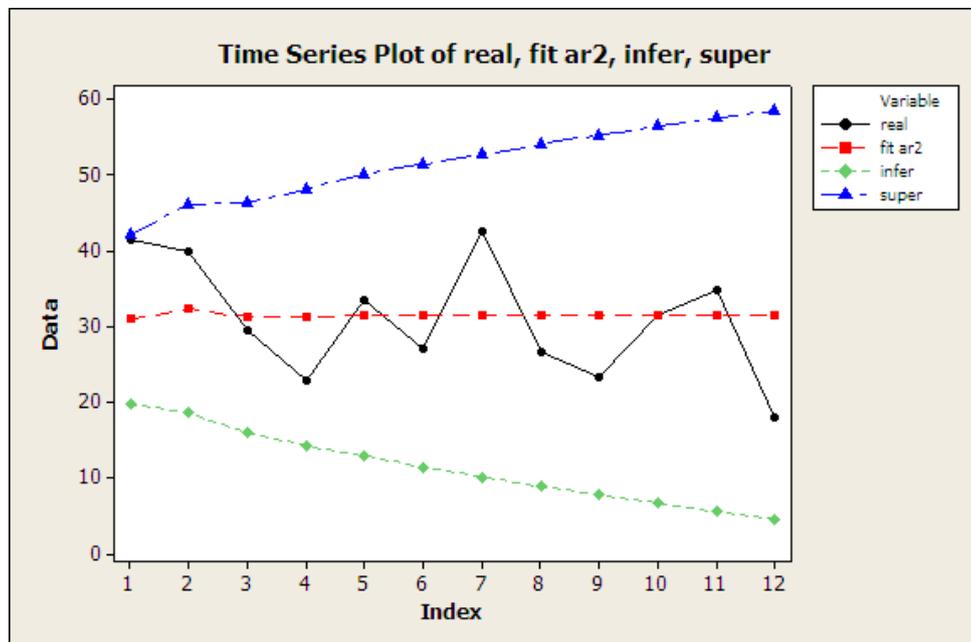


Figura 6.30

Se puede decir, que el modelo opera adecuadamente, pues cubre, dentro de la banda de 95% de confianza los valores observados los últimos tres meses (12 semanas). Además no hay diferencias considerables entre lo observado y el pronóstico.

Se estimará un modelo MA (2) para los datos, con la idea de comparar ambos modelos, el modelo AR (2) y el modelo MA (2). Esto se hace porque según la función de auto-correlación de la primera diferencia (Figura 6.26) el modelo MA (2) puede ser una alternativa.

El criterio del MSD menor nos ayudará a decidir cuál es mejor.

MA(2)

Final Estimates of Parameters					
Type		Coef	SE Coef	T	P
MA	1	0.2994	0.0588	5.09	0.000
MA	2	0.1576	0.0589	2.68	0.008
Constant		0.0258	0.1824	0.14	0.887

Tabla 18

En la Tabla 18, se puede ver que los dos coeficientes son significativamente diferentes de cero con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

A continuación se muestra en la Tabla 19 que no hay evidencia en contra del supuesto del modelo sobre las auto-correlaciones del error, según la prueba de Ljung-Box:

Modified Box-Pierce (Ljung-Box) Chi-Square statistic				
Lag	12	24	36	48
Chi-Square	9.0	17.2	22.0	39.9
DF	9	21	33	45
P-Value	0.438	0.698	0.928	0.688

Tabla 19

Abajo se muestra la gráfica de los pronósticos del modelo MA (2) ajustado junto con lo observado en los últimos tres meses. (ver Figura 6.31). Se puede decir, que el modelo opera adecuadamente, pues cubre, dentro de la banda de 95% de confianza los valores observados los últimos tres meses (12 semanas). Además no hay diferencias considerables entre lo observado y el pronóstico.

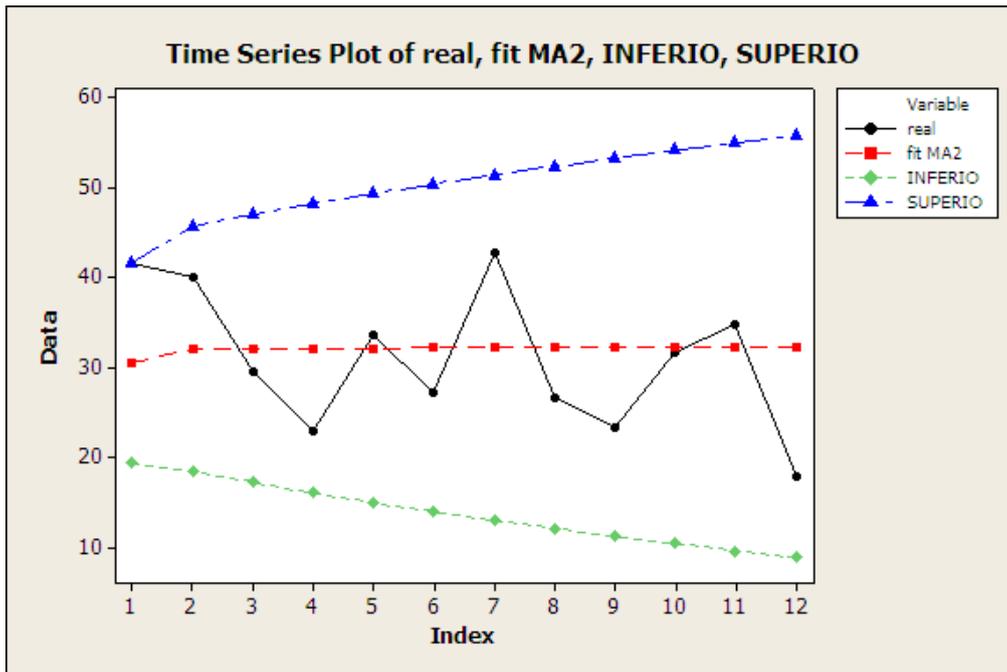


Figura 6.31

Al calcular los cuadrados medios de las diferencias (MSD) tenemos:

MSD para el AR(2) = 56.30231

MSD para el MA(2) = 61.29313

No hay diferencia muy notoria, pero el MSD del modelo AR (2) es menor que el MSD del modelo MA (2).

El AR (2) está, entonces, más cerca en promedio de los valores que el MA (2) y es más confiable su proceso de estimación, se decide elegir el modelo **AR (2)** para la serie de primeras diferencias de la serie de tiempo de las partículas PM 2.5. Para hacer pronósticos en la serie de las partículas PM 2.5 usamos, un modelo ARIMA (2,1,0).

Análisis de residuales.

Anteriormente, la prueba de Ljung-Box mostró que no hay evidencia contra el supuesto de que las auto-correlaciones del término de error son cero (son variables aleatorias independientes). Se revisará ahora aspectos adicionales sobre los residuales del modelo elegido AR (2).

Para la validación del modelo se observa la gráfica de auto-correlación de los residuales del modelo estimado (AR(2)). (Ver Figura 6.32)

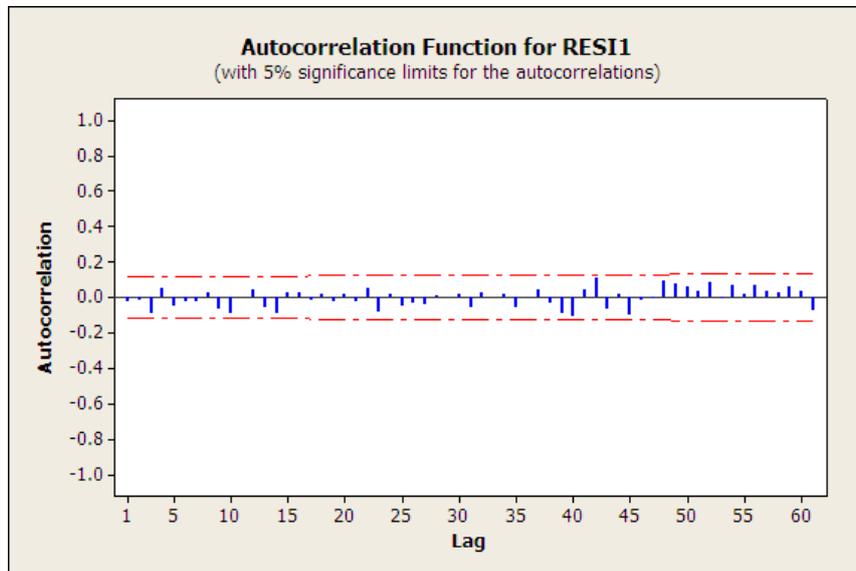


Figura 6.32

Los residuales son valores aleatorios independientes. Se observan fluctuando sobre el cero, lo cual es consistente con la hipótesis de los modelos ARIMA de que el término aleatorio tiene media cero.

En la Figura 6.33 se ve la gráfica de los residuales:

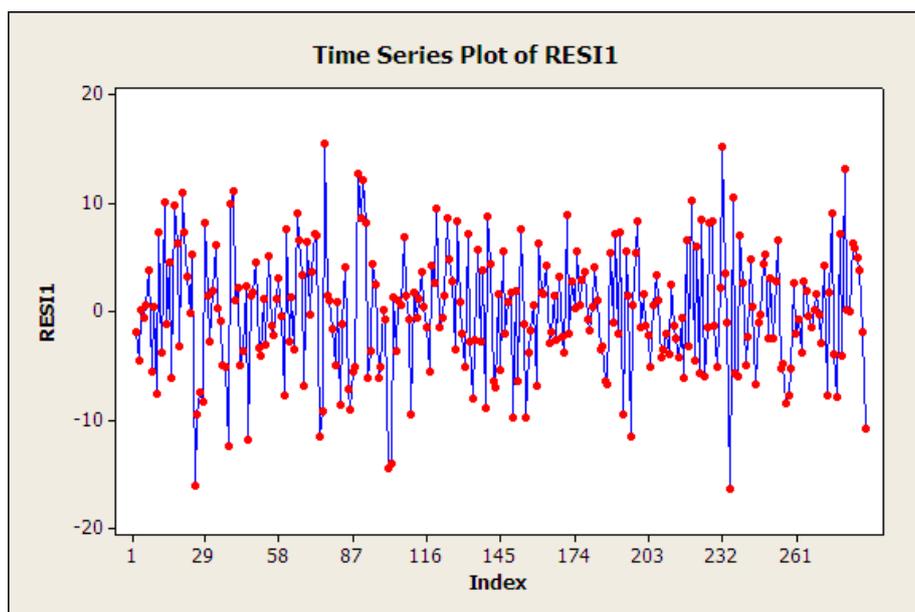


Figura 6.33

Esta gráfica tiene el modo esperado, no hay evidencias en contra de los supuestos del modelo. El modelo ARIMA (2,1,0) es una buena alternativa para hacer pronósticos en la serie de tiempo de las partículas PM 2.5.

TABLA RESUMEN DE LOS ANÁLISIS HECHOS CON *ARIMA* PARA LOS COMPONENTES DEL IMECA QUE SE ENCUENTRAN FUERA DE CONTROL NO₂, PM10 y PM2.5:

COMPONENTE	MODELO ARIMA para pronóstico a 3 meses
NO ₂	(3,1,0)
PM 10	(3,1,0)
PM 2.5	(2,1,0)

Tabla 20

A continuación se decidió comparar el método de doble suavizamiento exponencial con el método ARIMA de las partículas PM2.5, obteniéndose lo siguiente:

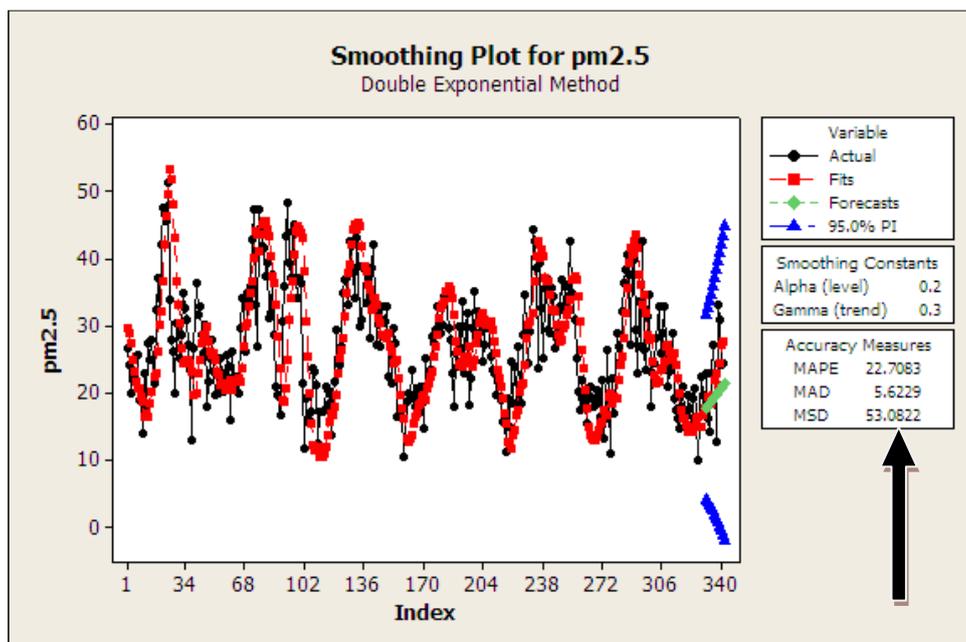


Figura 6.34

En esta gráfica empleando el método de doble suavizamiento exponencial, se obtiene un **MSD de 53.0822**, que comparado con el ARIMA (2,1,0) con un **MSD de 56.30231**, el método de doble suavizamiento exponencial muestra un menor MSD, lo cual nos podría decir que es mejor que el ARIMA, sin embargo, la diferencia no es, realmente grande, además, haciendo un acercamiento en la gráfica de la Figura 6.34, observamos resultados interesantes:

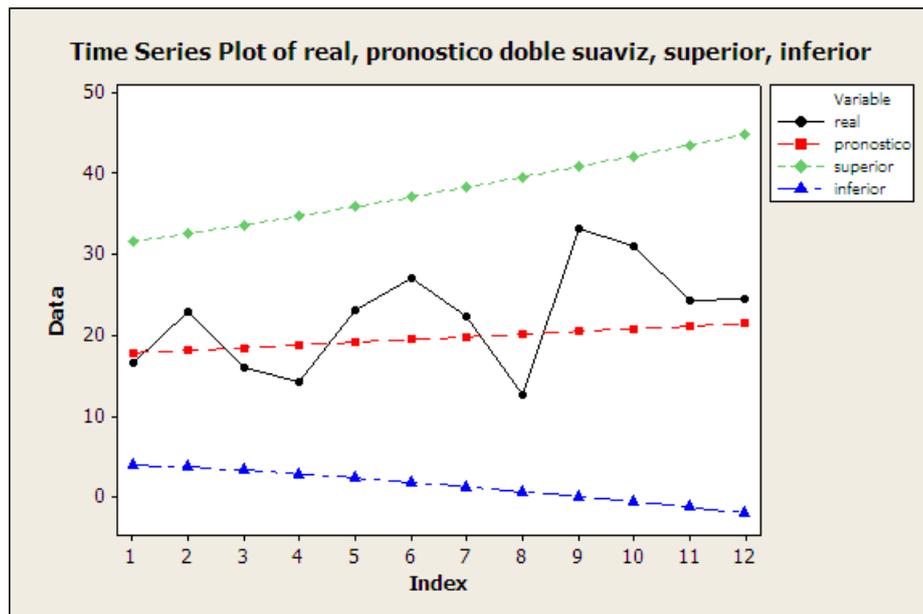


Figura 6.35

En la Figura 6.35 vemos que los límites inferior y superior del intervalo de confianza de 95% se van ampliando demasiado, incluso llegan a tomar valores negativos, lo cual nos indica que si el intervalo es tan grande se va perdiendo precisión en el pronóstico.

6.3 Análisis de regresión

El análisis de regresión se utiliza para explicar una determinada variable, digamos Y, en función de una variable X, o bien en función de varias variables X_1, X_2, \dots, X_k . en el primer caso se trata de regresión univariada o simple y en el segundo caso, de regresión múltiple.

El modelo de explicación en ambos casos es lineal, esto es, se asume que la dependencia entre Y y la variable explicativa X, en la regresión simple, adopta la forma:

$$Y = a + b X + \text{error}$$

O, en el caso de la regresión múltiple:

$$Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k + \text{error}$$

El término de error, se supone es variable aleatoria normal con media cero y varianza σ^2 , aparece porque cada vez que observamos una X (o combinación de varias X's), no siempre observaremos la misma Y. Por ejemplo, si X es la estatura de una persona, y Y el peso, cada vez que observemos una estatura, no siempre obtendremos el mismo peso en Y. Se supone también que los predictores X_1, X_2, \dots, X_k , son independientes (no correlacionadas). Si no se cumple este supuesto, decimos que tenemos un problema de multicolinealidad.

Los métodos estadísticos multivariantes y el análisis múltiple son herramientas estadísticas que estudian el comportamiento de tres o más variables al mismo tiempo. Se usan principalmente para buscar las variables más representativas, buscando al mismo tiempo las menos representativas para poder eliminarlas, simplificando así los modelos estadísticos en los que el número de variables sea un problema y para comprender la relación entre varios grupos de variables.

6.3.1 Análisis de regresión del IMECA

La base de datos que se empleó para hacer el análisis de regresión se obtuvo del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT).

Son bases de datos anuales de la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET), contienen información de los parámetros meteorológicos que se registran cada hora desde 1986. En la Tabla 21 se muestran los parámetros que se miden en la REDMET.

Parámetros que se miden en la REDMET:

Parámetro (símbolo)	Unidades de medición	Abreviatura del parámetro en las bases de datos	Inicio de medición
Temperatura (TMP)	Grados Celsius (°C)	Tmp	1986
Humedad relativa (RH)	Porcentaje (%)	Rh	1986
Dirección del viento (WDR)	Grados Azimut	Wdr	1986
Velocidad del viento (WSP)	Metros/segundo (m/s)	Wsp	1986

Tabla 21

Se trabajó con datos mensuales de cada uno de los parámetros que mide la REDMET. Con el propósito de determinar el mejor modelo de regresión, se calculó la matriz de correlaciones, en esta, se determina las variables con mayor correlación con el IMECA.

Los predictores son dirección del viento, humedad relativa, temperatura y velocidad del viento. En la tabla 22 se observa que dirección del viento, humedad relativa y temperatura tienen correlación muy alta con el IMECA y además, no existe correlación alta entre predictores, lo cual es importante porque no muestra evidencia de un posible problema de multicolinealidad. Los resultados se obtuvieron usando el programa estadístico MINITAB.

	dir_viento	humed_rel	temperatura	vel_viento
humed_rel	0.463			
temperatura	-0.076	0.122		
vel_viento	-0.039	-0.139	0.394	
imeca	-0.640	-0.794	-0.244	0.006

Tabla 22

El coeficiente de velocidad del viento no difiere significativamente de cero, de hecho está muy lejos de ser significativo ya que el valor $p = 0.7$ (ver tabla 23) y tiene una correlación muy baja con el IMECA, por lo que se tendrá que eliminar. Los coeficientes de las demás variables si difieren significativamente de cero a prácticamente cualquier nivel de significancia.

La ecuación estimada de regresión es:

$$\text{imeca} = 430 - 0.853 \text{ dir_viento} - 1.58 \text{ humed_rel} - 2.93 \text{ temperatura} - 2.64 \text{ vel_viento}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	429.82	25.28	17.00	0.000
dir_viento	-0.8530	0.1250	-6.82	0.000
humed_rel	-1.5789	0.1428	-11.06	0.000
temperatura	-2.9300	0.7923	-3.70	0.000
vel_viento	-2.635	6.829	-0.39	0.700

S = 14.1900 R-Sq = 75.6% R-Sq(adj) = 74.8%



Tabla 23

La R cuadrada ajustada es el porcentaje de la varianza en el IMECA que explican los predictores en su relación lineal con este. Para el modelo con los 4 predictores la R cuadrada ajustada es 74.8%, lo que indica, junto con el valor P en la tabla de ANOVA, (tabla 24) que el modelo es útil, aunque tiene un predictor cuyo coeficiente no difiere significativamente de cero, entonces, el modelo con 4 predictores no es el mejor modelo de regresión.

Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	70670	17667	87.74	0.000
Residual Error	113	22753	201		
Total	117	93423			

Tabla 24

Al eliminar velocidad del viento y correr nuevamente en MINITAB, los coeficientes estimados, el error estándar de cada estimación, el valor del estadístico T para la prueba de hipótesis de que el coeficiente es cero contra la alternativa de que es distinto de cero y el valor P de esta prueba, se observan en la Tabla 25:

La ecuación estimada de regresión es:

$$\text{imeca} = 427 - 0.858 \text{ dir_viento} - 1.57 \text{ humed_rel} - 3.06 \text{ temperatura}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	427.44	24.42	17.50	0.000
dir_viento	-0.8581	0.1238	-6.93	0.000
humed_rel	-1.5662	0.1384	-11.32	0.000
temperatura	-3.0622	0.7117	-4.30	0.000
S = 14.1370	R-Sq = 75.6%	R-Sq(adj) = 75.0%		

Tabla 25

En ésta tabla se muestra que todos los coeficientes de los predictores difieren significativamente de cero, es decir, tienen relación con la variación del IMECA. Cabe mencionar que son negativos, lo que indica que presentan relación inversa con el IMECA, es decir, cuando cualquiera de los predictores aumenta, (dirección del viento, humedad o temperatura) el IMECA disminuye. El coeficiente de temperatura es el de mayor magnitud, le sigue el de humedad y el menor es el de dirección del viento. Así entonces, la variable meteorológica, cuyo aumento significa una mayor disminución en el nivel del IMECA es la temperatura. Entre los otros dos predictores, la humedad tiene mayor impacto sobre el IMECA que la dirección del viento. El efecto de la temperatura es aproximadamente el doble que el de la humedad y a su vez, el impacto de la humedad es aproximadamente el doble que el de la dirección del viento.

La R cuadrada ajustada con este modelo es del 75%, lo cual es ligeramente mejor que la del modelo con las cuatro variables, lo que nos dice es que este modelo es mejor para hacer pronósticos de IMECA dado un valor de temperatura, humedad relativa y dirección del viento. El modelo que incluye estos tres predictores se considera el mejor modelo de regresión, de la información disponible.

A continuación se muestra en la Tabla 26 el análisis de varianza:

Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	70640	23547	117.82	0.000
Residual Error	114	22783	200		
Total	117	93423			

Tabla 26

El análisis de varianza nos indica que el modelo es útil pues el valor $p=0$ implica que al menos uno de los coeficientes de los predictores no es cero. La Tabla 26 muestra que, de hecho, todos los coeficientes difieren significativamente de cero, y ya no podríamos eliminar a ninguno de ellos.

Para validar los supuestos del modelo, observamos las gráficas de los residuales, abajo se muestran en la Figura 6.36.

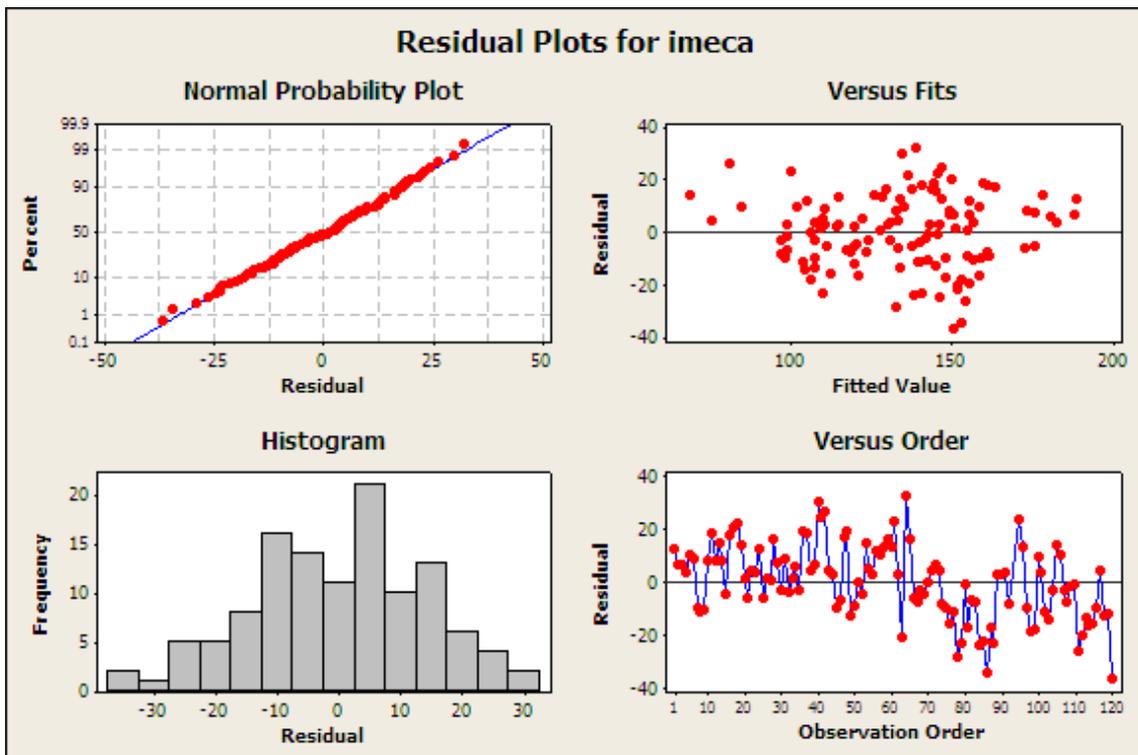


Figura 6.36

Análisis de los residuales

Este análisis se lleva a cabo para comprobar si el supuesto de normalidad del error es válido, además de ser variable aleatoria de varianza constante (no dependiente del valor de los predictores) y con media cero.

El supuesto de que la media de los residuos es igual a cero no parece ser falso si observamos el histograma de la Figura 6.36.

La distribución de los residuos no presenta evidencia en contra del supuesto de normalidad. Los residuos observados y esperados bajo la hipótesis de distribución normal deben ser parecidos. Esta suposición se verifica con el gráfico de probabilidad, que permite comparar gráficamente la función de distribución asumida, en este caso, la distribución normal. Si la distribución de los errores es normal, los residuales deberían estar situados sobre la recta que pasa por el origen con pendiente igual a 1, como lo muestra la Figura 6.36.

La prueba de normalidad de Anderson-Darling de los residuales tiene un valor P de 0.929. La prueba de normalidad de Ryan-Joiner tiene un valor P mayor a 0.05. No hay evidencia entonces en contra del supuesto de normalidad del error, los residuales se distribuyen alrededor del cero y no se observa ningún patrón sospechoso en lo referente a su variación, entonces podemos aceptar el supuesto de varianza constante y media cero en el error.³⁹

Mean	-2.17980E-13
StDev	13.95
N	118
AD	0.171
P-Value	0.929

Se concluye que no hay evidencia en contra de los supuestos del modelo.

³⁹ <http://www1.inei.gob.pe/biblioineipub/bancopub/est/lib0385/anex15.htm> consultado 15 de diciembre 2010

Resumen y conclusiones

El análisis de la tendencia a largo plazo de cada uno de los componentes del IMECA, se revisa ajustando para cada una de las series de tales componentes una curva de tendencia de las llamadas curvas de Gompertz, lo cual nos ayudó a determinar qué contaminantes representan riesgos a largo plazo, para la salud. Con esto se pudo identificar componentes que están fuera de las normas establecidas y por lo tanto fuera de control. Los elementos en estas condiciones son: el NO₂, las partículas PM 10 y las partículas PM 2.5. Los demás componentes del IMECA; ozono, monóxido de carbono y dióxido de azufre muestran una tendencia asintótica decreciente hacia cero y con últimos valores reportados dentro de los límites máximos de tolerancia, por lo que no representan riesgos inmediatos de salud, sin embargo, se recomienda realizar este tipo de análisis con datos actualizados año tras año.

Los riesgos a la salud asociados con los componentes que se encuentran fuera de control son varios, dentro de estos mencionamos los siguientes:

- ✓ El *dióxido de nitrógeno* (NO₂) produce trastornos como:
 - Irritación de la piel y mucosas.
 - Penetra los alvéolos.
 - Aumento del metabolismo antioxidante.
 - Daño celular en el pulmón.

- ✓ *Las partículas mayores a 10 micrómetros* son retenidas básicamente en las vías respiratorias superiores y eliminadas en su mayor parte por el sistema de limpieza natural del tracto respiratorio, por lo que no son consideradas significativamente dañinas para la salud, sin embargo la exposición continua a altas concentraciones puede causar irritación de garganta y mucosas.

- ✓ *Por su parte, las partículas menores a 10 micrómetros* (fracción respirable) no son retenidas en las vías respiratorias superiores, cerca de un tercio penetra hasta los pulmones. Su efecto va a depender de su composición química, pero pueden producir irritación de las vías respiratorias, agravar el asma y favorecer las

enfermedades cardiovasculares. Se relacionan con la enfermedad de los pulmones negros en mineros, silicosis y asbestosis.

Los grupos de la población con mayor susceptibilidad a los efectos de las partículas son:

- Niños
- Adultos mayores
- Personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares previas
- Fumadores
- Personas que respiran por la boca

Los estudios recientes demuestran que *las PM_{2.5}* tienen la capacidad de ingresar al espacio alveolar o al torrente sanguíneo, incrementando el riesgo de padecer enfermedades crónicas cardiovasculares y muerte prematura.

El resto de los componentes del IMECA como el *ozono* muestra un decremento en sus concentraciones máximas con respecto a los lineamientos y normas vigentes. En los últimos dos años se ha incrementado el número de días por debajo del límite máximo permitido, sin embargo, todavía existe una situación de riesgo por exposición, sobre todo en la región suroeste como consecuencia del transporte de vientos.

En 2010 se reportó una mejoría en el número total de días en los que la calidad del aire fue menor a 100 puntos IMECA; con estos resultados, “se estima que el balance de la calidad del aire en la capital, al concluir el año 2010, es positivo con respecto a los últimos 24 años”.

En el caso del ozono, se registró un nuevo máximo histórico de días con cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana, con 216 días limpios; en 2009, fueron 185 y los meses más contaminados de 2010 fueron marzo y diciembre.

Para finales de 2010, “la información del Sistema de Monitoreo Atmosférico indicó un incremento en el número de días con una condición favorable por ozono, pasando de 51 por ciento a casi 60 por ciento de días limpios por ozono.

Para el caso del *monóxido de carbono*, de acuerdo con los datos del monitoreo atmosférico, desde 1991 la concentración de monóxido de carbono en el aire ambiente ha presentado una tendencia a la baja. La renovación del parque vehicular, la instalación de sistemas de inyección electrónica y la incorporación de los convertidores catalíticos en los vehículos que circulan en la Ciudad de México son las medidas que han impactado de manera significativa en la disminución de este contaminante.

Finalmente el dióxido de azufre, de acuerdo con los datos del monitoreo atmosférico, desde 1992 la concentración de dióxido de azufre en el aire ambiente ha presentado una tendencia a la baja. La medida que ha provocado un mayor impacto en la concentración de este contaminante es la reducción gradual del contenido de azufre en los combustibles empleados en el Valle de México, tanto para la industria como para los vehículos.

Para los componentes del IMECA cuya tendencia a largo plazo mostraron estar fuera de las normas establecidas, tales como, el NO₂, las partículas PM 10 y PM 2.5, se les ajustó un modelo ARIMA con el cual se puede hacer pronósticos a corto plazo (3 meses). Por medio de estos modelos ajustados es posible anticiparse a posibles situaciones de riesgo permitiendo implementar medidas preventivas a fin de disminuir los riesgos asociados a un posible aumento en los niveles de estos contaminantes.

Por último se efectuó un análisis de regresión, en el cual, se estudió la relación que existe entre cuatro variables meteorológicas: velocidad del viento, humedad, dirección del viento y temperatura y el IMECA, encontrándose que la dirección del viento, la humedad relativa y la temperatura tienen correlación muy alta con el IMECA, sin embargo, la velocidad del viento tiene una correlación muy baja con el IMECA.

Eliminando del modelo la variable velocidad del viento, con los parámetros restantes, dirección del viento, humedad relativa y temperatura, se estimó nuevamente un modelo final de regresión. Este modelo final debe ser considerado el mejor modelo de regresión para este conjunto de variables en relación con el IMECA, pues todas las variables afectan significativamente, al nivel 0.05, la variación del IMECA.

Los coeficientes estimados para las tres variables del modelo final son negativas, lo cual implica que cuando la dirección del viento, la humedad relativa o la temperatura aumenten el IMECA disminuirá. En los resultados obtenidos, el coeficiente de temperatura es el de mayor magnitud, esto significa que el aumento de temperatura (verano por ejemplo) significará una mayor disminución en los niveles del IMECA que el aumento de cualquiera de las otras dos variables. Entre la humedad relativa y la dirección del viento, la primera tiene mayor impacto sobre el IMECA que la segunda. La temperatura tiene aproximadamente el doble de efecto que el de la humedad y el impacto de la humedad es aproximadamente el doble que el de la dirección del viento.

Hay dos variables en relación con el viento, la velocidad y la dirección. Puede sorprender que la velocidad no esté afectando la variación del IMECA, pero la dirección sí. En la velocidad del viento existen dos componentes, el componente horizontal y el componente vertical, el componente horizontal es la velocidad, mientras que el componente vertical es la dirección. Hay dependencia del componente vertical ya que juega un papel muy importante en la dispersión, pues se relaciona con vientos ascendentes, pero no así en el componente horizontal que puede no representar disminución del nivel de contaminantes. Por ejemplo, con dirección del viento en posición horizontal débil, en nivel de IMECA generalmente no presenta cambios, pero cuando exista suficiente viento ascendente (vertical) como para transportar hacia arriba a los precursores de los contaminantes, el nivel del IMECA descenderá.

De acuerdo a los resultados de la regresión, puesto que diciembre es un mes frío y las bajas temperaturas se relacionan inversamente con el IMECA, se concluye que existen riesgos mayores de contaminación elevada durante el invierno; en marzo cuando hay poca humedad y menos vientos, el IMECA igualmente tiende a subir, por lo que también se podrían alcanzar niveles elevados de contaminantes.

Conclusiones generales y recomendaciones

Conclusiones:

En esta parte final del trabajo se plasman las experiencias, conclusiones a objetivos planteados, formulación del problema, así como todo lo relacionado con la elaboración del trabajo.

De acuerdo con el objetivo principal planteado, se determinaron modelos de series de tiempo y pronósticos del comportamiento de los componentes del IMECA. Este objetivo principal, trajo consigo una serie de planteamientos secundarios que fueron nombrados como objetivos específicos y sus conclusiones más relevantes son:

1. En el capítulo 2 se describió la evolución histórica de las mediciones, mediante el Índice Metropolitano de la calidad del aire (IMECA) como indicador de la calidad del aire. Más adelante, en el capítulo 4 se abordaron las tres contramedidas (cierre de la refinería de Azcapotzalco, uso de gas natural de la Central Termoeléctrica del Valle de México y la implementación del Programa “Hoy no Circula”) que han favorecido a la disminución de algunos componentes del IMECA, que junto con normas para vehículos y para el sector industrial, son acciones asociadas a la prevención y control de la contaminación del aire.
2. Con la ayuda del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) se logró recolectar datos históricos de cada componente del IMECA que fueron de gran utilidad para el desarrollo de este trabajo.
3. En el capítulo 5 se revisaron y estudiaron los diferentes modelos de series de tiempo y métodos para establecer pronósticos según se requiera.
4. En el desarrollo del capítulo 6 se aplicaron y propusieron los modelos de series de tiempo para analizar el comportamiento de los componentes del IMECA que se encuentran fuera de control.
5. Finalmente se planteó el análisis causal por medio de un análisis de factores meteorológicos sobre el valor reportado en el IMECA.

Es importante dar a conocer las vivencias propias que personalmente tuve la oportunidad de experimentar durante el tiempo que fue necesario dedicar para la obtención de la información especializada que, desde luego constituyo la base y posteriormente sirvió de estímulo en la tarea de elaboración de este trabajo.

Las actividades realizadas día con día a este respecto, consistentes en visitas a diferentes lugares, que aparentemente fueron pérdidas de tiempo y de desgaste físico y económico, influyeron para crear un mayor interés personal por encontrar las Instituciones Públicas que cuentan con la información citada.

En este sentido, se debe reconocer al Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, Servicio Meteorológico Nacional, Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal como Instituciones gubernamentales que mayor impulso proporcionaron a este fin.

Mención aparte representa la información específica y actualizada que obtuvimos del Sistema de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA-GDF) empleado para la vigilancia y el monitoreo de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México, que cuenta con la infraestructura técnica para atender su medición y control en la Ciudad de México y la zona metropolitana que la circunda.

Las medidas implementadas por las autoridades competentes respecto al control de la calidad del aire, han resultado benéficas de manera general en el ámbito territorial mencionado y de manera especial, en las zonas más críticas consideradas como las fuentes mayores de contaminación: El Centro Histórico de la Ciudad de México y las grandes avenidas que lo comunican, como la Avenida Insurgentes, Paseo de la Reforma, el Viaducto, el Periférico, etc.

Podemos citar como principales medidas que efectivamente han contribuido a reducir y por ende, controlar la contaminación, mejorando con ello la calidad del aire, el cierre de la refinería de Azcapotzalco, el uso de gas natural de la Central Termoeléctrica del

Valle de México y la implementación del Programa “Hoy no circula”, así como nuevas normas para los vehículos (Programa de Verificación Vehicular) y para el sector industrial.

No obstante que las medidas implementadas por los Órganos de Gobierno, con el apoyo técnico de las Instituciones educativas son de carácter obligatorio, se requiere y es urgente la acción voluntaria y decidida que cada uno de nosotros como ciudadanos responsables, llevemos a cabo de manera consciente para proteger nuestro entorno y mantenerlo limpio y libre de toda contaminación. Lo anterior implica "poner la basura en su lugar", "afinar oportunamente el automóvil", "conducir con educación vial", "disminuir y re ubicar las industrias contaminantes", "Reforestar nuestra Ciudad", etc.

Finalmente podemos decir que la oportunidad de obtener la información requerida en la elaboración de esta Tesis, es fundamental para evitar el manejo erróneo de datos, cifras y estadísticas que representen de manera fehaciente nuestra realidad respecto a la calidad del aire que respiramos diariamente.

La experiencia adquirida en la elaboración de esta Tesis representa una gran satisfacción personal, en virtud de que se aprende y se sigue aprendiendo sobre las series de tiempo, pronósticos y su aplicación a un problema real y vigente, como lo es el de la contaminación en la Ciudad de México. Debo reconocer que el SIMAT fue la base para su logro y la obtención o cumplimiento de los objetivos planteados, no sin antes reconocer el invaluable y gran apoyo recibido por el Director de la misma.

Recomendaciones:

Los habitantes de la gran Ciudad de México debemos hacer plena conciencia de la contaminación que producimos y en consecuencia ser participantes activos en las acciones y medidas que permitan su efectivo control, ya que no solo afecta a quienes la habitamos y a nuestro País, sino también a todo el mundo.

Las autoridades deben mantenerse al tanto de la gravedad de la situación y hacerse cargo de la misma, aplicando conscientemente las medidas oportunas que incluyan los recursos necesarios que se deben prever.

Sin duda alguna será necesario que la sociedad este de acuerdo con ello y consecuentemente apoye activamente en la atención a este problema, razón por la cual es de suma importancia que se le mantenga informada y se le dé a conocer el riesgo actual y futuro que la contaminación del aire representa a la fecha en términos de atención de enfermedades y de posibles muertes prematuras de las personas más sensibles que habitan en esta gran urbe.

Todo esto exigirá la intervención de las autoridades del Sector Ambiental, así como de los Organismos de los Sectores involucrados, a fin de que establezcan la prioridad y la importancia que requiere el problema como parte esencial de los Programas y Planes de Trabajo del Gobierno en sus ámbitos Federal, Estatal y Municipal, así como de Entidades no Gubernamentales, incluyendo la parte correspondiente a la asignación de recursos suficientes.

Es importante también promover y facilitar la educación en el área ambiental, mediante el fomento en la población infantil del amor por la naturaleza y la protección y sana convivencia con ella, ya que como individuos, como familias y como sociedad, depende de nosotros cuidar, proteger y convertir la hermosa Ciudad de México, en un espacio más seguro, limpio y saludable.

Asimismo, cabe mencionar que los resultados presentados en este trabajo de los modelos ajustados pueden estar cambiando, por lo que es recomendable repetir el procedimiento en forma periódica para mantener actualizado el modelo propuesto.

En estudios posteriores, se pueden analizar las causas de la contaminación como resultado de otras variables meteorológicas, como pueden ser: radiación solar, presión barométrica, entre otras, así como parámetros fisicoquímicos, contaminación industrial, vehicular, etc. Al respecto es conveniente continuar con un monitoreo que se lleve a cabo año con año, a efecto de actualizar el estudio e implementar las acciones conducentes.

BIBLIOGRAFÍA

Libros consultados:

- ✓ Pronósticos en los negocios, John E. Hanke y Dean W. Wichern,. 9ª. Edición, Pearson Educación, México, 2010
- ✓ The analysis of time series an introduction, C. Chatfield, 4a. edición.
- ✓ Pronósticos, series de tiempo y regresión. Un enfoque aplicado, Bowerman, Bruce L., Richard T.O'Connell y AnneB. Koehler, , 4ª ed, pp 1-13

Páginas de internet:

- ✓ http://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=RBuVV10yTq4C&oi=fnd&pg=PA44&dq=antecedentes+de+la+calidad+del+aire+en+el+mundo&ots=GxtoLdrBK5&sig=kcmCdI4D6RObUiug765j_ZYdl0#v=onepage&q=antecedentes%20de%20la%20calidad%20del%20aire%20en%20el%20mundo&f=false consulta 8 de octubre 2010
- ✓ <http://www.tuobra.unam.mx/publicadas/030115172514.html> consultada el 8 de octubre 2010
- ✓ <http://www.mty.itesm.mx/die/ddre/transferecia/Transferencia55/eli2-55.htm> consultada 13 octubre 2010
- ✓ http://www.sma.df.gob.mx/transparencia/I/plan_verde_vlarga.pdf consultada el 19 de octubre 2010
- ✓ <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/informaciontecnica/index.php?opcion=4&opciondifusion=29> el 19 de julio 2010
- ✓ <http://www.aulafacil.com/pronosticos-investigacion/curso/Lecc-5.htm> consultada el 20 de agosto 2010
- ✓ <http://www.cepis.org.pe/bvsci/fulltext/guiasaire.pdf> consultado el 25 de octubre 2010
- ✓ http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/informe2008/informe_anual_2008.pdf consultada el 25 de octubre 2010
- ✓ <http://www.cepis.org.pe/cepis/e/cepisacerca.html> consultada el 26 de octubre 2010
- ✓ http://es.wikipedia.org/wiki/Fondo_Mundial_para_la_Naturaleza consultada el 26 de octubre 2010

- ✓ <http://www.cinu.org.mx/onu/estructura/mexico/org/onudi.htm> consultada el 26 de octubre 2010
- ✓ http://www.wmo.int/pages/about/index_es.html consultada el 26 de octubre 2010
- ✓ [http://mce2.org/education/Triptico_MCE2-Final%20\(ltm%2010-16-07\).pdf](http://mce2.org/education/Triptico_MCE2-Final%20(ltm%2010-16-07).pdf) consulta 26 de octubre 2010
- ✓ http://www.cec.org/Page.asp?PageID=1115&BL_WebsiteID=1&AA_SiteLanguageID=3&CFID=12021799&CFTOKEN=12660720 consultada el 26 de octubre 2010
- ✓ <http://www.cleanairnet.org/lac/1471/channel.html> consultada el 26 de octubre de 2010
- ✓ <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/index.php?opcion=37> consultado el 20 de octubre 2010
- ✓ <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/index.php?opcion=10#crono> consultada el 10 de septiembre 2010
- ✓ http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_Monitoreo_Atmosf%C3%A9rico_de_la_Ciudad_de_M%C3%A9xico consultada el 27 de octubre 2010
- ✓ <http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/6963/1/A2.769.pdf> consultada 27 de octubre 2010
- ✓ [http://es.wikipedia.org/wiki/Geograf%C3%ADa_del_Distrito_Federal_\(M%C3%A9xico\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Geograf%C3%ADa_del_Distrito_Federal_(M%C3%A9xico)) consultada 27 de octubre 2010
- ✓ <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/informaciontecnica/index.php?opcion=4&opciondifusion=24> consultada el 28 de octubre 2010
- ✓ <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/informaciontecnica/index.php?opcion=2&opcionmonitoreo=1> Consultado el 29 de julio de 2010
- ✓ http://www.sma.df.gob.mx/simat/programas_ambientales/anexo/elementos_hnc.pdf consulta 30 de octubre 2010
- ✓ <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/informaciontecnica/index.php?opcion=2&opcionmonitoreo=2> consultada el 29 de julio 2010
- ✓ http://www.sma.df.gob.mx/simat/programas_ambientales/anexo/elementos_hnc.pdf consulta 30 de octubre 2010
- ✓ <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/informaciontecnica/index.php?opcion=2&opcionmonitoreo=3> consultada el 29 de julio 2010

- ✓ <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/informaciontecnica/index.php?opcion=2&opcionmonitoreo=4> consultada el 29 de julio 2010
- ✓ <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/informaciontecnica/index.php?opcion=2&opcionmonitoreo=5> consultada el 29 de julio 2010
- ✓ <http://www.pemex.com/index.cfm?action=content§ionID=122&catID=11642> consultada el día 4 de noviembre 2010
- ✓ <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/viii-006.pdf> consultada 9 de noviembre 2010
- ✓ http://www.sma.df.gob.mx/simat/programas_ambientales/anexo/elementos_hnc.pdf consultada el 20 de octubre de 2010
- ✓ <http://www.dandoenelblanco.com/2008/07/modelos-de-series-de-tiempo-para-pron%C3%B3sticos-de-demanda.html> consultada el 29 de noviembre 2010
- ✓ <http://www.gestiopolis.com/recursos/documentos/fulldocs/ger1/serietiempo.htm> consultada noviembre 2010
- ✓ <http://www1.inei.gob.pe/biblioineipub/bancopub/est/lib0385/anex15.htm> consultado 15 de diciembre 2010