

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD CULHUACAN**

TESIS INDIVIDUAL

Que como prueba escrita de su Examen Profesional para obtener el Título de Ingeniero Mecánico, deberán desarrollar la C.:

VALERY HURTADO TORRES

**“ESTUDIO DE LA CONTAMINACION AMBIENTAL DE LA CIUDAD DE MEXICO MEDIANTE LOS
MODELOS REDES NEURONALES ARTIFICIALES Y ALGORITMOS GENETICOS”**

En los últimos años en la Ciudad de México las emisiones nocivas han ido en aumento de manera evidente, tan sólo en el primer semestre de este año 2016 se ha llegado a la fase 1 de contingencia ambiental en seis ocasiones y se han alcanzado hasta 164 puntos IMECA. Dichas condiciones causan cada vez mayores estragos económicos, en materia de salud y demás ámbitos, a los que se responde con planes de acción temporales o de emergencia que no tienen un acercamiento óptimo para solucionar la situación.

Es por ello, llevar a cabo un estudio sobre el comportamiento de los contaminantes aéreos, representa una evaluación científica de las consecuencias a afrontar en los próximos años, mediante lo cual la estructura de criterios de control tendría un sustento para priorizar los recursos destinados a atender cada área de oportunidad para la mejora de la calidad del aire, permitiendo desarrollar estrategias adaptadas a las necesidades específicas de la Ciudad de México.

CAPITULADO

Capitulo I	Antecedentes
Capitulo II	Contaminación
Capitulo III	Modelos de predicción de series de tiempo
Capitulo IV	Modelo Propuesto
	Resultados

Ciudad de México, a 10 de Noviembre de 2016

PRIMER ASESOR

SEGUNDO ASESOR

M. EN C. JUAN CARLOS PAREDES ROJAS

M. EN C. FERNANDO ELÍ ORTÍZ HERNÁNDEZ

Vo. Bo.

APROBADO

**ING. MIGUEL ANGEL LOPEZ VEGA
JEFE DE LA CARRERA DE I.M.**

**ING. CARLOS AQUINO RUIZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA UNIDAD CULHUACÁN

Estudio de la contaminación ambiental de la Ciudad de
México mediante los modelos Redes Neuronales artificiales
y Algoritmos Genéticos

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

Presenta:

Valery Hurtado Torres

Asesores:

M. en C. Juan Carlos Paredes Rojas
M. en C. Fernando Eli Ortiz Hernández



Ciudad de México, Noviembre 2016

Agradecimientos

A quien es motor y combustible a la vez, gracias por crear todas las condiciones que me trajeron a la vida y a este momento. Gracias por darme la vocación de crear y con ella la oportunidad de honrar tu ejemplo.

A mis padres, les agradezco infinitamente aceptar el reto de recibirme en sus vidas. Gracias por siempre dar lo mejor de sí y ser un ejemplo de responsabilidad y valentía. De no ser por los hábitos que formaron en mí, su dedicación y el cuidado de formarme un criterio yo no habría podido aprovechar las oportunidades que la vida me ha dado. Los Amo con el alma y también a sus exigencias. Soy muy afortunada por tenerlos conmigo apoyándome, confiando en mí y porque me dieron la certeza de que puedo lograr todo lo que sueñe y me proponga.

A mis hermanos humanos por haber tenido la fuerza y la nobleza de recorrer el camino antes que yo, recibir los golpes de la vida y compartir esa experiencia conmigo para hacer mi vida más suave. Sepan que lo duro de esas experiencias no fue en vano pues sirvió para cuidar de mí. Los Amo por escucharme, ser mis cómplices, compartir conmigo recuerdos, nuestro propio lenguaje y la dicha de lo que significa contar con ustedes.

A mis hermanos caninos les agradezco su amor y amistad incondicionales que me dieron prueba de lo intangible. Les agradezco enseñarme que el verdadero amor viene con el compromiso, el sacrificio y el perdón, así como que el respeto se gana y que aquel que no sabe ser leal a sí mismo, a los suyos y a sus principios no vale nada.

Al resto de mi familia le agradezco sus participaciones en mi vida. A los que ya no están sepan que los guardo con amor y respeto en mi recuerdo. A los que siguen conmigo les agradezco sus detalles, consejos y hasta nuestras discusiones, después de todo ustedes fueron mi primer contacto con el mundo y una preparación para afrontarlo.

A te che sei stato accanto a me da tanti anni, grazie per capire il mio pazzesco pensiero, curare di me e farmi sentire amata. Insieme siamo un bel ingranaggio.

A mis buenos maestros que al amar su profesión tuvieron el acierto de sembrar en mí no sólo conocimiento sino también esa pasión por lo que uno hace. Especialmente agradezco a la Ing. Carolina por ayudarme y apoyarme en una etapa muy difícil, al I.Q. Emmanuel Fco. Alpírez por inspirarme, a los Ing. Martín Bazaldua Aguillón y Walter Ott por complicarme la vida, herir mi orgullo y retarme a ser una mejor versión de mí en lo profesional. A mi muy amada Miss Ruth, a Miguel González, Elisa Pérez, Monika Vargas, Bruno Hühnermund y Jorge Contreras, mil gracias por ayudarme a derribar fronteras y regalarme la bendita habilidad de expresar mis ideas en más de una lengua.

A los doctores Juan Carlos Paredes R. y Héctor Rodríguez Rangel gracias por su apoyo en la elaboración de esta tesis, por el respaldar mi trabajo y darme a conocer el extraño mundo de la investigación. Así mismo agradezco al Ing. Uriel Rubio Escamilla que haya compartido sus conocimientos conmigo y colaborado en la realización de esta tesis.

Resumen

En el presente trabajo se estudiaron los registros del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire de la Ciudad de México (IMECA) en el periodo de Enero de 2012 a Agosto de 2016. Con base en dichos registros se diseñó un modelo predictivo de comportamiento de los contaminantes criterio (NO₂, CO, O₃, SO₂ y PM₁₀) mediante una red neural artificial de tipo feed-forward entrenada mediante algoritmos genéticos.

Para diseñar el modelo se llevo a cabo lo siguiente: los registros recolectados se simplificaron para obtener la lectura horaria más alta de las registradas para cada contaminante y definir así los puntos IMECA horarios. Con la serie de tiempo del año 2012, dividida en bloques de 800 lecturas, se construyó la población que el algoritmo genético operó, tomando el 70% del bloque para el entrenamiento de la red y el 30% para su validación. El algoritmo genético construyó 500 generaciones de 1200 individuos constituidos por 10152 genes y a partir de los vectores de los individuos, se eligió la arquitectura idónea para la red neuronal artificial que lleva a cabo la predicción.

Los datos que se obtuvieron a partir de los reportes del IMECA fueron graficados y analizados mostrando que en el transcurso del tiempo se han observado cada vez más lecturas en el rango de mala calidad según el IMECA que además sobrepasan los límites establecidos por la OMS.

El modelo diseñado es capaz de predecir con 24h de antelación las lecturas del IMECA con un error cuadrático medio de 0.0016 en la etapa de evaluación y de 1.421 en la validación el presente modelo es la base para realizar análisis específicos del comportamiento de la contaminación en la Ciudad de México a futuro.

Abstract

The present work carried out a study of the Metropolitan Index of Mexico City's air quality data (IMECA) registered from January, 2012 to August, 2016. Based on this reports a forecasting model of the criteria pollutants behaviour (NO₂, CO, O₃, SO₂ and PM₁₀) was designed by the implementation of a feed-forward artificial neural network trained using genetic algorithms.

To develop the forecasting model the collected data were simplified so that the highest hourly record of each pollutant could be obtained and therefore define the IMECA points reached. The population the genetic algorithm worked with was built using year 2012 time series divided into blocks of 800 data from which 70% was utilized for the net's training and 30% for its validation. The genetic algorithm built 500 generations of 1200 individuals containing 10152 genes. The individuals' vectors were used to determine the optimum network architecture to carry out the forecast.

The data from the IMECA reports were plotted, showing that as years went by more and more data reached the interval of poor quality according to the IMECA units of measurement which also surpass the limits for air quality established by the WHO.

The designed forecasting model is able to predict the IMECA 24h in advance with a MSE of 0.0016 during training and 1.421 for the validation stage. This model is the foundation for future analysis specially focused on the pollution trends in Mexico City.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVO GENERAL.....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
JUSTIFICACIÓN.....	2

ANTECEDENTES

A.1.1 Contaminación en México: detección del problema y políticas desarrolladas.....	4
A.1.2 Instituciones federales competentes en materia ambiental.....	7
A.1.3 Planes de acción, programas y normatividad a nivel federal.....	9
A.2.1 Detección de la contaminación como problemática en la Ciudad de México.....	10
A.2.2 Instituciones de protección ambiental en la Ciudad de México.....	11
A.2.3 Planes de acción, programas y normatividad de cuidado ambiental implementados en la Ciudad de México.....	11
A.3 Implicaciones de la contaminación del aire en la salud de la población.....	16
A.4 Impacto económico.....	18
Referencias de los Antecedentes.....	18

CAPÍTULO I: CONTAMINACIÓN

I.1 Contaminación.....	23
I.2 Tipos de contaminación y contaminantes.....	23
I.3 Contaminación y contaminantes del aire en la Ciudad de México.....	26
I.4 Metodología e Instrumentos para la medición de la contaminación aérea en la Ciudad de México.....	33
I.5 Consecuencias ambientales de los contaminantes criterio.....	34
Referencias del Capítulo I.....	35

CAPÍTULO II: MODELOS DE PREDICCIÓN DE SERIES DE TIEMPO

II.1 Series de tiempo.....	38
II.2 Modelos de pronóstico de series de tiempo.....	40
II.2.1 Naive.....	40

II.2.2 Modelo Auto Regresivo	41
II.2.3 Modelo de Medias Móviles.....	41
II.2.4 ARMA.....	41
II.2.5 ARIMA	42
II.2.6 ANN	42
II.2.7 Holt-Winters.....	45
II.3 Últimas investigaciones relacionadas a la predicción de contaminante realizadas con asistencia de algoritmos computacionales	46
Referencias del Capítulo II	48

CAPÍTULO III: MODELO PROPUESTO

III.1.1 Red Neuronal Feed-Forward	50
III.1.2 Algoritmos Genéticos	50
III.1.3 MSE	52
III.2 Datos a analizar.....	53
III.3 Modelo	53

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

IV.1.1 Análisis de datos.....	57
IV.1.2 Análisis del modelo	62
IV.2 Conclusiones.....	64
IV.3 Trabajo Futuro	65

ANEXOS

ANEXO A: SIMAT.....	67
ANEXO B: NADF-009-AIRE-2006.....	70
ANEXO C: Valores recomendados por la OMS.....	83
ANEXO D: Glosario.....	84

Introducción

El acelerado crecimiento de la Ciudad de México ha modificado de tal forma las condiciones ambientales en la misma hasta llegar a repercutir negativamente en la calidad de vida de sus habitantes, principalmente debido a los niveles de contaminación del aire.

Los altos niveles de contaminantes aéreos producen innumerables disturbios como lo son daños a la salud que consecuentemente resultan en pérdidas de productividad, dañando tanto la economía individual como la dinámica de la misma a escala social.

Otra problemática consecuencia de la contaminación en la Ciudad de México, son los constantes cambios en los programas de circulación que establecen prohibiciones de manera repentina al elevarse la concentración de contaminantes, limitando la movilidad de la ciudadanía. Las inconsistencias del programa vial conllevan a una aglomeración de usuarios en los servicios de transporte público agravando las condiciones de movilidad.

Desafortunadamente, el papel que desempeña la capital dentro de los intereses económicos y políticos del país para su desarrollo, ha resultado en un énfasis dirigido al aumento de actividades industriales y de prestación de servicios que, apegadas a la modernización y por ende alejándose cada vez más de la naturaleza, dañan al ecosistema. Ejemplo de ello es la expansión del territorio de la ciudad que debido a la explosión demográfica en ella, ha provocado la exterminación de áreas verdes sustituidas actualmente por condominios y centros comerciales.

También la demanda de agua y su uso han exigido que ésta sea traída a la ciudad desde otras regiones, principalmente desde zonas boscosas alejadas, deteriorando las condiciones ambientales incluso fuera de la Ciudad de México en ecosistemas que son fuentes vitales de oxígeno.

El descontrol generado por la contaminación alcanza niveles cuyo ritmo es insostenible e imposible de ignorar. Las determinaciones hechas respecto a cómo se enfrenta el caudal de consecuencias negativas de la contaminación, no han sido capaces de abordar de manera eficiente la problemática. Las estrategias no se planifican apropiadamente, las medidas tomadas carecen de visión a largo plazo, no son funcionales para la población, la contaminación continua incrementándose y propiciando tanto el descontento social como la desconfianza en la competitividad de las instituciones.

El enfoque actual para mitigar los efectos de la contaminación busca soluciones instantáneas y/o temporales. No se ha tomado consciencia apropiadamente del estado aún controlable y hasta cierto punto reversible de la contaminación en la Ciudad de México pues no se aprovechan los recursos científicos disponibles para garantizar el progreso y cumplimiento estricto de las agendas de cuidado ambiental.

En conclusión, los intentos por responder al creciente deterioro ambiental han sido demasiado débiles e insuficientes, ni el ecosistema ni la ciudadanía puede soportar más la fatiga de sobrevivir a la contaminación. Falta coherencia dentro de la estructuración de estrategias en materia ambiental.

Objetivo general

Diseñar un modelo predictivo que represente el comportamiento de los contaminantes en la Ciudad de México implementando una red neuronal artificial.

Objetivos específicos

- 1.-Analizar las emisiones históricas de Enero de 2012 a Agosto de 2016.
- 2.- Diseñar la estructura de la red neuronal utilizando algoritmos genéticos.
- 3.-Entrenar y validar el modelo.
- 4.-Propuesta ambiental para disminuir las emisiones contaminantes.

Justificación

En los últimos años en la Ciudad de México las emisiones nocivas han ido en aumento de manera evidente, tan sólo en el primer semestre de este 2016 se ha llegado a la fase 1 de contingencia ambiental en seis ocasiones y se han alcanzado hasta 164 puntos IMECA (). Dichas condiciones causan cada vez mayores estragos económicos, en materia de salud y demás ámbitos a los que se responde con planes de acción temporales o de emergencia que no tienen un acercamiento óptimo para solucionar la situación.

Es por ello que llevar a cabo un estudio sobre el comportamiento de los contaminantes aéreos, representa una evaluación científica de las consecuencias a afrontar en los próximos años, mediante lo cual la estructuración de criterios de control tendría un sustento para priorizar los recursos destinados a atender cada área de oportunidad para la mejora de la calidad del aire, permitiendo desarrollar estrategias adaptadas a las necesidades específicas de la Ciudad de México.

ANTECEDENTES

A.1.1 Contaminación en México: detección del problema y políticas desarrolladas

Los primeros indicios de la contaminación ambiental en México se hacen evidentes durante la década de los setentas, tras un periodo en el cual el desarrollo de la nación se liga de manera estrecha con la industrialización (INE, 2007).

Debido a la creciente notoriedad de los contaminantes, se promulga la Ley federal para prevenir y controlar la contaminación ambiental el 23 de marzo de 1971 (INECC, 2000). De esta ley resalta el hecho de que en sus artículos se contempla atender la contaminación de aire, aguas y suelo haciendo uso de la experiencia de secretarías especializadas en cada sector afectado (SEMARNAT, 2013) como se aprecia en la Figura A.1.

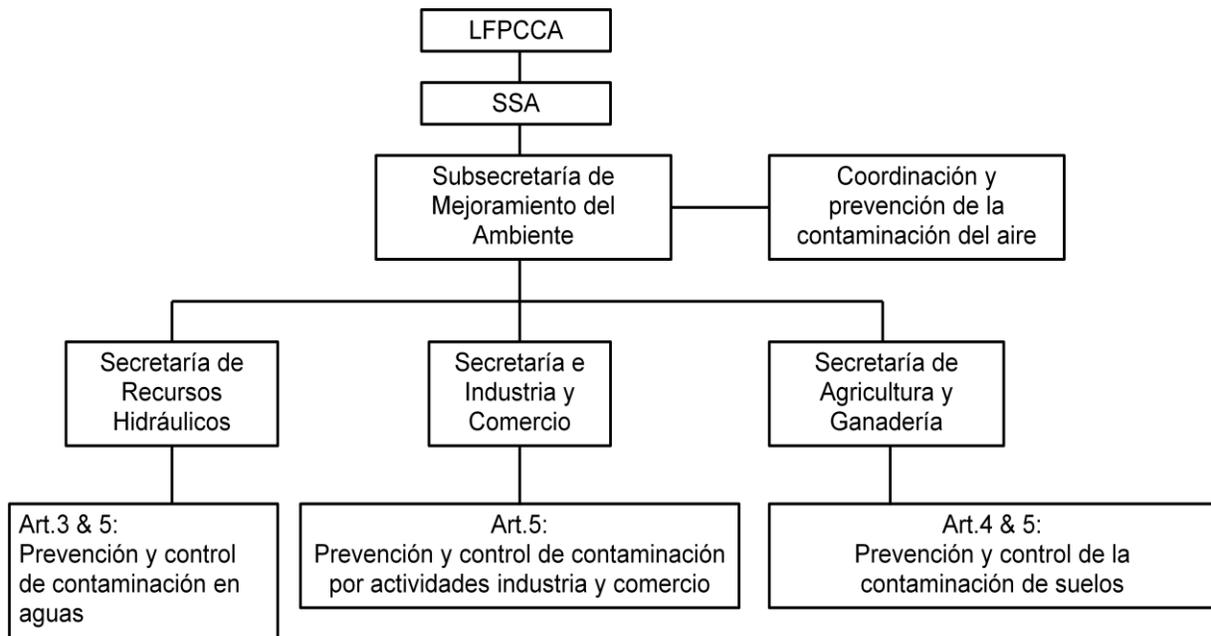


Figura A.1 Artículos y secretarías para la implementación de la LFPCCA

Continuando ahora con un enfoque de tipo sanitario, en 1972 se instituye la Subsecretaría para el mejoramiento del medio ambiente que es la responsable de la normatividad y planes para el mejoramiento ambiental. Ésta tenía cinco subsectores: planeación, operación, investigación, coordinación y control. Por su diseño estrechamente vinculado a las políticas de desarrollo y modernización del país, su desempeño respecto a lo ecológico no da la respuesta esperada (Corrales Gil, 2009).

Posteriormente a consecuencia de la cumbre de la Tierra de Estocolmo de 1972 que convoca a los estados miembros de la ONU, (ambiente, 2011) se establece PNUMA, sector de la ONU orientado a la educación y defensa en materia de uso sostenible del medio ambiente mundial en los países afiliados (PNUMA, 1999). La consecuencia de mayor impacto de PNUMA sobre México se da en 1974 se fundó la ORPALC, subdivisión encargada de la preservación ambiental

en América Latina y el Caribe en siete ámbitos: cambio climático, desastres y conflictos, manejo de ecosistemas, gobernanza ambiental, productos químicos y desechos, eficiencia de recursos y revisión del medio ambiente (sustentable). Gracias al trabajo de la ORPALC, México ha desarrollado estudios sobre economía verde y la oferta de trabajos de bajo impacto ambiental.

Como se puede apreciar por lo anteriormente mencionado, durante el sexenio del presidente Luis Echeverría (1970-1976) los asuntos ambientales son incluidos en la agenda política, pero él es firme respecto a la industrialización por lo cual las políticas y planes para la mejora ambiental se dejan mayormente en el papel.

De acuerdo con el INEEC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) los primeros estudios de impacto ambiental se aplican en 1977, al menos en lo que a administración pública federal se refiere (INECC, 2000) .

Posteriormente, a la llegada del presidente Miguel de la Madrid en 1982, a pesar de que los temas ambientales forman parte importante de su discurso político, los asuntos económicos nuevamente son de mayor importancia para él.

En la década subsecuente se dan múltiples cambios orientados a la mejora ambiental, en 1982 se crea la Ley Federal de Protección al ambiente misma que incluye normas y otros aspectos legales relativos a la conservación, restauración y mejoramiento del ambiente en México.

Para 1987 se implementa una mejora significativa del artículo 73 constitucional, el cual faculta al congreso para expedir leyes en materia de protección al ambiente, iniciativa que tiene frutos cuando al año siguiente se expide la Ley general de Equilibrio Ecológico y la protección al ambiente que recalca la prevención como el método más eficaz para a preservación de los ecosistemas (ILCE, 2016).

En 1992 mediante la cumbre de la Tierra de Río de Janeiro, los países integrantes de la ONU se reúnen a tratar temas como la creciente escasez de agua y apoyo al sector de transporte público para reducir las emisiones contaminantes, además de ser la base para el desarrollo del protocolo de Kyoto (ambiente, 2011). Dicha cumbre permite la fundación de la Comisión para el desarrollo Sostenible cuya función es velar por que se cumpla lo establecido en la cumbre.

El proyecto del Inventario Nacional de emisiones para México (Rojas Bracho) surge en 1995, este es el inicio del monitoreo de los contaminantes aéreos.

La implementación del protocolo de Kyoto en México se llevó a cabo hasta 1997, gracias a éste se establecen los porcentajes de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero pues exige una reducción de al menos un 5.25% en las emisiones contaminantes de CO₂, solicitud que el gobierno Federal se compromete a cumplir.

Durante la Cumbre de la Tierra de Johannesburgo en 2002, los países integrantes de la ONU establecen una nueva agenda para revertir los efectos de la degradación ambiental, cuyo éxito radicó en la creación de organizaciones de seguimiento de lo establecido a corto plazo (ambiente, 2011). Su repercusión en México fue el diseño de ciclos de trabajo por la mejora ambiental planificados hasta 2017 mismos que se pueden apreciar en la tabla A.1.

Tabla A.1 Ciclos de trabajo consecuencia de la cumbre de Johannesburgo

Ciclo	Grupo temático
2004-2005	Agua, saneamiento y asentamientos humanos
2006-2007	Energía, desarrollo industrial, contaminación atmosférica y cambio climático
2008-2009	Agricultura, desarrollo rural, tierra, sequía desertificación
2010-2011	Transporte, productos químicos, gestión de desechos, minería, consumo y producción sostenibles
2012-2013	Bosques, diversidad biológica, biotecnología, turismo y montañas
2014-2015	Océanos, mares, recursos marinos, pequeños estados insulares, en desarrollo, desastres y vulnerabilidad
2016-2017	Evaluación general Programa 21, Plan de Johannesburgo

El daño generado por la contaminación se agrava seriamente no sólo por el aumento de las fuentes contaminantes sino también por la reducción de las áreas verdes. México ocupa el quinto lugar mundial en deforestación, pues para 2007 se estima que cada año pierde alrededor de 600 mil hectáreas de bosques y selvas, lo que equivale a perder cada año una superficie equivalente a cuatro veces el Distrito Federal (Greenpeace, 2009)

El presidente Felipe Calderón aprueba el Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012 publicado en el Diario oficial mexicano el 28 de Agosto de 2009, en el que México establece el compromiso de reducir las emisiones de GEI en 20% en 2020 y en 50% en 2050 respecto a las emisiones del año 2000 (Ramos, 2011).

Al llegar el 2010 México se convierte en el primer país en América Latina con una infraestructura para verificar y validar la emisión y mitigación de gases de efecto invernadero mediante el programa de acreditación de organismos validadores de GEI por la Entidad Mexicana de Acreditación (Ramos, 2011).

En el año 2011 México se ubica en el lugar número 13 entre los primeros 15 países generadores de Gases Efecto Invernadero (GEI) y es responsable del 2% de total arrojado a la atmósfera, por lo que es uno de los principales responsables del cambio climático global (Ramos, 2011).

Durante el año 2014 El Plan de Acción Regional sobre Contaminación Atmosférica es aprobado por el XIX Foro de Ministros de Medio Ambiente para América Latina y el Caribe. Es elaborado

en conjunto por el INECC y el Clean Air Institute bajo el auspicio de PNUMA y de común acuerdo con expertos de toda la región. Su finalidad es establecer directrices a corto, mediano y largo plazo para disminuir la contaminación del aire en la región. Dentro de sus objetivos principales se encuentra normalizar las emisiones de los integrantes a modo de que sigan los estándares de la OMS, que estén obligados a comunicar la calidad del aire a la población y aquellos que no cuenten con un sistema de monitoreo lo implementen en la menos una ciudad de su país (Institute, 2014).

En el presente año, México como estado miembro de la OMS, firmó una hoja ruta con la cual se determinan las acciones que se deben tomar entre 2016 y 2019 con cuatro vertientes principales: difundir los efectos adversos de la contaminación del aire, vigilar las tendencias de salud, aprovechar el sector salud como canal de concientización y mejorar la respuesta del sector salud ante las enfermedades originadas por causa de la contaminación del aire (Excelsior, 28).

A.1.2 Instituciones federales competentes en materia ambiental

Debido al creciente interés de la comunidad tanto internacional como nacional por la regulación, implementación y control de las legislaciones en materia ambiental la consolidación de instituciones destinadas a dicho propósito vio la luz durante la década de los setentas (Mihelcic, 2012) y ha proseguido hasta nuestros días, en el caso de México su evolución en materia federal es la representada en la tabla A.2.

Tabla A.2 Desarrollo histórico de Instituciones federales competentes en materia ambiental

Año de Fundación	Institución	Objetivos
1972	Subsecretaría para el mejoramiento del medio ambiente	Crear políticas de mejoramiento ambiental, programas prevención y control de la contaminación ambiental y normatividad correspondiente.
1982	Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE)	Formulación e implementación de la política ambiental de la nación
1989	Comisión Nacional del Agua (CNA)	Promover el manejo integrado y sustentable del agua, mejorar la calidad del agua suministrada e incrementar la cobertura de los servicios de agua potable
1992	Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL)	Promover el desarrollo social mediante la protección de recursos humanos y materiales
1994	Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP)	Administración, planeación y ejecución de política mexicana respecto a la protección, conservación y restauración del ambiente.
2000	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)	Conservación y aprovechamiento sustentable de los ecosistemas, prevención y control de la contaminación, gestión integral de los recursos hídricos y combate al cambio climático.

Cada una de estas instituciones atiende a los sectores a su cargo mediante órganos internos o descentralizados. En junio de 1992 la SEDESOL crea jurídicamente a la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), como un órgano administrativo desconcentrado, con autonomía técnica y operativa. La finalidad de dicha procuraduría es atender y controlar el creciente deterioro ambiental en México tanto en sus ciudades como en sus bosques, selvas, costas y desiertos. Entre sus principales actividades se encuentran salvaguardar los intereses de la población en materia ambiental, vigilar el cumplimiento de las disposiciones legales o normas ambientales, y sancionar a las personas físicas y morales que violen dichos preceptos (PROFEPA, 2013).

En el caso de la SEMARNAP al ser creada en 1994 está integrada por los siguientes subsectores:

- Subsecretaría de Recursos Naturales
- Subsecretaría de Pesca
- Instituto Nacional de Ecología
- Instituto Nacional de la Pesca
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA).
- Comisión para el Conocimiento de la Biodiversidad (CONABIO)

En el año 2000 la naciente SEMARNAT se consolida con tres subsecretarías, órganos desconcentrados y descentralizados. Dichas subsecretarías son: de fomento y normatividad ambiental, de gestión para la protección ambiental y de planeación y política ambiental. Los órganos desconcentrados de la SEMARNAT son las delegaciones federales, la Comisión Nacional del Agua (CNA), el Instituto Nacional de Ecología (INE), la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) y la Comisión Nacional de áreas naturales protegidas (CONANP). Finalmente los órganos descentralizados de la SEMARNAT son la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

No todas esas instituciones siguen vigentes, algunas de ellas como es el caso de la SEDUE y la SEMARNAP, se renovaron para dar lugar a la SEDESOL y la SEMARNAT.

Dentro de las instituciones no gubernamentales que apoyan la mejora de las condiciones ambientales está el Centro Mario Molina, asociación civil, independiente y sin fines de lucro, creada en 2004 para dar continuidad y consolidar en México las actividades desarrolladas por el Dr. Mario Molina. Su propósito es encontrar soluciones de manera práctica, realista y a fondo, problemas relacionados con la protección del ambiente, el uso de la energía y la prevención del cambio climático, con el objetivo de fomentar el desarrollo sustentable (Molina, 2014).

Otra institución sin fines de lucro dedicada a combatir el cambio climático y los efectos de la contaminación es el Clean Air Institute y está bajo el mando del Dr. Mario Molina. Su enfoque es global pero se interesa especialmente por las condiciones de América Latina (Institute, Clean Air Institute, 2013).

A.1.3 Planes de acción, programas y normatividad a nivel federal

Anteriormente en México, la normatividad se basaba en la Ley sobre normas industriales, publicada el 11 de febrero de 1946, que está enfocada a las características técnicas de un producto, sistema o servicio. La Ley Federal de Protección al Ambiente estableció dentro de los lineamientos del artículo 5 la facultad de la SEDUE para fijar los niveles permisibles de las emisiones contaminantes generadas tanto por fuentes fijas como móviles (INECC, 2000).

Al principio de la década de 1990 se inicia la implementación de los programas PROAIRE en diversas zonas del país para el mejoramiento de la calidad del aire, entre los que se encuentran:

- Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica 1990-1995
- Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000 (PROAIRE)
- Programa de Administración de la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey 1997-2000 (PACADAMM)
- Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana de Guadalajara 1997-2001
- Programa para el Valle de Toluca 1997-2000 (Aire Limpio)
- Programa de Gestión de la Calidad del Aire de Ciudad Juárez 1998-2002
- Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010

Otra política implementada por el gobierno mexicano es el Acuerdo de Cooperación Ambiental para América del Norte (ACAAN) suscrito en 1993 en forma paralela a la firma del Tratado de Libre Comercio con Estados Unidos y Canadá (CCA, 2016), el cual establece que a manera de apoyo a los principios del Tratado de libre comercio, se promovería de manera cooperativa el desarrollo sustentable de las partes y la mejora de la observancia y aplicación de las leyes de materia ambiental, además de promover prácticas para la disminución de la contaminación (ambiental, 1993).

Para 2003 la OCDE reconoce los avances de las políticas ambientales en México, mismas que permitieron una reducción de los dióxidos de azufre y carbono en las áreas urbanas (OECD, 2003).

El Comité de Asuntos Ambientales de la Organización Internacional de Normalización (ISO) trabajó en las normas ISO14,064 e ISO 14,065 respecto a las especificaciones de validación y verificación de GEI, publicadas en 2006, a partir de las cuales en 2007 y 2008 el Instituto

Mexicano de Normalización y Evaluación de la Conformidad trabajó desarrollando las equivalencias mexicanas que esclarecen los procesos de verificación y validación de los GEI y determinan los elementos necesarios para la acreditación de los organismos que validarán su cumplimiento (Ramos, 2011).

Si bien la SEMARNAT regula, a través de la NOM (INE, INE, 2007), las emisiones de contaminantes como bióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), bióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), partículas suspendidas totales (PST) y partículas menores a diez micrómetros de diámetro (PM₁₀) y plomo (Pb), como las mostradas en la tabla A.3, México carece de normatividad regulatoria de contaminantes como el benceno, formaldehído, acetaldehído y 1,3 butadieno.

Tabla 1.3 Ejemplos de Normas reguladoras de emisiones de contaminantes

Contaminantes	Normas en materia de Salud	Normas técnicas
PM 10	NOM-025-SSA1-2014	
PM2.5	NOM-025-SSA1-2014	NOM-035-SEMARNAT-1993
O ₃	NOM-020-SSA1-2014	NOM-036-SEMARNAT-1993
NO ₂	NOM-023-SSA1-1993	NOM-037-SEMARNAT-1993
SO ₂	NOM-022-SSA1-2010	NOM-038-SEMARNAT-1993
CO	NOM-021-SSA1-1993	NOM-034-SEMARNAT-1993

El PRASA (Programa de Acción en Salud Ambiental) parte del Programa nacional de salud 2001-2006, es diseñado para proteger la salud de la población de los efectos por la exposición innecesaria o excesiva a agentes dañinos, a través de mejoras a los servicios de salud ambiental. (Salud, 2002)

A.2.1 Detección de la contaminación como problemática en la Ciudad de México

Considerando el ritmo de crecimiento desmedido de la Ciudad de México, los efectos de factores antrópicos generadores de contaminación en dicho territorio han impactado considerablemente las condiciones en que se encuentra el ecosistema a su alrededor.

La suma de emisiones de gases nocivos y partículas suspendidas penetra los suelos provocando depósitos de metales pesados en ellos, lo que lleva a que la Ciudad de México esté catalogada entre las que tienen mayor grado de contaminación en suelos a nivel mundial (Morton Bermea, Hernández Álvarez, González Hernández, Romer, Lozano, & Berameni Orosco, 2009)

En cuanto al abastecimiento de agua en la Ciudad, la proporción existente para satisfacer servicios y al consumo humano no cubre las expectativas, por lo cual en terrenos agrícolas como es el caso de los cultivos de Xochimilco, se utilizan aguas negras para el riego, generando riesgos para la salud de la población y fomentando la formación de bacterias ajenas al sustrato (Rosas, Báez, & Coutiño, 1984).

La principal afección se debe a la contaminación del aire. La visibilidad promedio de 100km de la que se gozaba en 1940 se redujo drásticamente hasta 1.5km en el año 2000 (Yip & Madl, 2000)

A partir de 1984 se ha observado, cada cinco años, un incremento superior a 20 por ciento en el número de vehículos y en la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera en la Ciudad de México. Si bien el sector transporte emite 18 por ciento de los GEI en México, en la capital esta proporción llega al 43 por ciento, y los principales contribuyentes son los autos particulares.

La norma que regula la concentración máxima de ozono en el aire es rebasada 233 días al año en la zona metropolitana del Valle de México.

Los vehículos automotores son responsables del 44 por ciento del total de la energía que se consume en el valle de México, quemando 40 mil barriles de diesel y 1 millón de barriles de petróleo al día.

En el año 2016, de acuerdo con la Base de datos global sobre la polución del aire en ambientes urbanos, realizado por la Organización Mundial de la Salud, la Ciudad de México ocupa el séptimo lugar nacional en el recuento de las ciudades más contaminadas por partículas finas en suspensión (IMCO, IMCO, 2016).

A.2.2 Instituciones de protección ambiental en la Ciudad de México

La autoridad competente en la Ciudad de México para el cuidado ambiental es la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, que a través de seis ejes busca convertir a la Ciudad de México en una urbe verde y competitiva en materia ambiental y de calidad de vida para sus habitantes. Sus seis rubros de enfoque son: Calidad del aire y cambio climático, Movilidad sustentable, Suelo de conservación y biodiversidad, Infraestructura urbana verde, Abastecimiento y Calidad del Agua y Educación y comunicación ambiental.

Dentro de las direcciones internas de la SEDEMA las encargadas de cuestiones de preservación ambiental se encuentran la Dirección General de la comisión de recursos naturales, la Dirección General de la Gestión de la calidad del aire, la Dirección General de Bosques Urbanos y Educación Ambiental, la Dirección General de Zoológicos y Vida Silvestre, la Dirección General de Regulación Ambiental, y la Dirección General de Vigilancia Ambiental.

Lleva a cabo el cumplimiento de sus objetivos a través de 19 normas locales, 16 reglamentos, 13 leyes, 6 normas ambientales federales, 9 acuerdos, 5 códigos, 1 estatuto gubernamental y dos reglamentos de operación.

A.2.3 Planes de acción, programas y normatividad de cuidado ambiental implementados en la Ciudad de México

En la década de los ochentas, fueron necesarias medidas para el control de la contaminación en la Ciudad de México. Primeramente se lleva a cabo la sustitución del uso de combustóleo por gas natural, aunándose una mejora de las gasolinas reduciendo el contenido de tetraetilo de plomo en ellas. En 1986 se inicia el registro sistemático de los niveles de contaminación, con la instalación de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVM.

En 1990 el programa de verificación vehicular entro en vigor, se introdujeron las gasolinas oxigenadas y comenzó el programa Hoy no Circula. El Hoy no circula es un programa para regular el flujo de automóviles en circulación en la Ciudad de México y el Estado de México. Su objetivo es ejercer control sobre la contaminación generada por estos vehículos. En combinación con el plan de verificación vehicular se estipula quiénes pueden circular (circula, 2016).

El programa de verificación vehicular es un proceso de control realizado sobre los vehículos de forma periódica mediante el cual se evalúa el nivel de emisiones que producen y se les asigna un holograma para su uso en el programa de circulación. Dichos hologramas son los siguientes:

- Holograma Exento
- Holograma 00 o Doble Cero
- Holograma 0 o Cero
- Holograma 1 o Uno
- Holograma 2 o Dos

En octubre de 1990 entró en vigor el Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica 1990-1994 (PICCA), con la finalidad era la reducción de las emisiones de plomo, bióxido de azufre, monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno (INECC, INEEC, 2002). Las áreas de enfoque de este programa eran las siguientes: la industria petrolera, el transporte, la industria privada y los establecimientos de servicios, las termoeléctricas, la reforestación y restauración ecológica, la investigación, educación ecológica y comunicación social.

Se buscaba permanecer debajo de los valores indicados en las normas internacionales de plomo, así como tampoco las normas nacionales e internacionales en cuanto al bióxido de azufre (a partir de diciembre de 1991 se prohibió el uso de combustibles con más de 2% de azufre) (Lacasaña-Navarro, Aguilar Garduño, & Romieu, 1999).

Para dar seguimiento a las acciones del plan PICCA, la SEMARNAP y el Departamento del Distrito Federal acordaron en 1996, la instrumentación del Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000, conocido como PROAIRE, mismo que ha tenido actualizaciones como se aprecia en la tabla 1.5. Principalmente se busca reducir concentraciones

pico y promedio de ozono para mitigar los efectos en la salud que éste tiene a corto y largo plazo.

Tabla A.4 Medidas Incluidas en PROAIRE ZMVM 2002-2010

Proaire	Medidas del sector industrial	Medidas por sector de servicios	Metas de reducción	Comentarios
Proaire ZMVM 2002-2010	Control de emisiones de contaminantes emitidos por la industria Instrumentación de programas de industria más limpia	Reducción de emisiones de Hidrocarburos en lavanderías de lavado en seco Verificación de los sistemas de recuperación de vapores en estaciones de servicio	5935 ton. de hidrocarburos por año	Incluye 200 empresas Contempla la instalación de sistemas de recuperación de solventes

Desde el año 2000 la Ciudad de México presenta cada dos años inventarios de emisiones contaminantes y de efecto invernadero. El Inventario de emisiones fue creado para identificar a las fuentes generadoras y las aportaciones de cada una de ellas. Es una estimación de todas las emisiones contaminantes y representa el fundamento de los programas de mejoramiento de la calidad del aire en México. La metodología que lo respalda fue desarrollada por el INE con apoyo de la Agencia de Protección al ambiente de los Estados Unidos (USEPA) y la Asociación de Gobernadores de Oeste (WGA) (INECC, INECC, 2016).

Otra medida ambiental de especial interés en la ZMVM es el Programa de Contingencia ambiental. Se utiliza en algunas ciudades o zonas metropolitanas de México, donde las normas de calidad del aire son sobrepasadas frecuentemente. Sus medidas son de tipo temporal y se aplican a los sectores generadores de las emisiones con la finalidad de reducir la contaminación atmosférica, informar respecto a ésta a la población y evitar o reducir su exposición a los contaminantes. (INECC, INECC, 2014).

Debido a la notoriedad de la contaminación causada por partículas suspendidas, causante de la espesa capa que limita la visibilidad, se creó la campaña AERAS. Su propósito es estudiar el comportamiento y las características fisicoquímicas de las partículas suspendidas durante los

meses de invierno, cuando sus niveles alcanzan su concentración máxima. En 2013 se realizó una campaña piloto y se realizaron campañas en 2014, 2015 y 2016 (CDMX, CDMX)

Para la regulación del cálculo del índice de calidad del aire, desde 2006 se hace uso de la Norma Ambiental del Distrito Federal NADF-009-AIRE-2006. Ésta establece los requisitos para su cálculo y difusión, considerándose cinco de los contaminantes criterio: dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono y partículas suspendidas. La escala va de 0 a 500, donde el valor de 100 se asigna al valor indicado por la Norma Oficial Mexicana para cada contaminante. Un valor menor a 100 se considera satisfactorio y con un bajo riesgo para la salud. Cualquier nivel superior a 100 implica algún riesgo para la salud.

A partir del 2007, por iniciativa de la SEDEMA se inicia el programa de azoteas verdes en la Ciudad de México que dentro de sus propuestas concede una reducción de los impuestos de predial a las propiedades que implementen una azotea verde. Tan sólo en su primer año se lograron implementar poco más de 3300 m² de azoteas verdes.

El 27 de noviembre de 2012, se publican además los "Lineamientos para la elaboración de programas de manejo de las áreas de valor ambiental del Distrito Federal, con categoría de barranca". La importancia de su conservación radica en que son fuente del 60% del agua consumida en la Ciudad de México y el objetivo de dichos lineamientos es lograr un aprovechamiento sustentable de las barrancas, preservar el uso de suelo designado para éstas, restaurar su valor e involucrar a la ciudadanía en el manejo responsable.

Para el 2014 se crea el Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México con la finalidad de integrar y difundir información sobre el manejo de estos residuos y con ello fortalecer la planeación estratégica pertinente.

Para el periodo comprendido entre 2014-2020 el instrumento de para disminuir los riesgos ambientales, sociales y económicos derivados del cambio climático es el Programa de Acción Climática de la Ciudad de México (PACCM) .Dicho plan en combinación con la Estrategia Local de Acción Climática (ELAC) busca fomentar mayor información en la población y reducir su vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático, así como mitigar las emisiones de GEI estableciendo una cooperación positiva entre ciudadanía y gobierno respecto a las emisiones de carbono.

La Estrategia Local de Acción Climática de la Ciudad de México 2014–2020 es la guía de las políticas de la Ciudad de México frente a los efectos del cambio climático, mediante la cual se busca hacer a la ciudad más competitiva dentro de un marco de desarrollo sustentable, así como establecer metas y planes que reduzcan las emisiones (SEDEMA, SEDEMA).

En el presente 2016 el gobierno de la Ciudad de México inicia el Programa de reforestación CDMX, a través del cual se lleva a cabo el saneamiento y reforestación de avenidas y camellones con especies adecuadas a las condiciones climáticas y urbanas. Se tiene una inversión inicial de 50mdp para la adquisición de 3500 ejemplares de especies botánicas entre los que figuran acacias, ahuehuetes, encinos, sauces y jacarandas entre otros, además del equipo para su instalación y mantenimiento. Su beneficio consiste en absorber un estimado de 66500 toneladas de dióxido de carbono en un periodo de crecimiento de 50años.

Para el segundo semestre del 2016 entra en vigor el nuevo reglamento de verificación vehicular obligatoria cuya finalidad es monitorear el impacto ambiental de los vehículos. La norma que establece sus condiciones es la NOM-EM-167-SEMARNAT-2016. Continúa con la dinámica en base a hologramas mediante los cuales se determinan los días de circulación permitidos para el auto. Tiene un costo de 472MXN y en caso de ser un vehículo exento o con permiso especial, dichos hologramas son extendidos de manera gratuita.

Aplica a todos los vehículos automotores matriculados y/o que circulen en el territorio de la Ciudad de México, y los que porten placas metropolitanas, así como a los pertenecientes al territorio conocido como megalópolis que engloba a los estados de México, Tlaxcala, Morelos, Puebla e Hidalgo.

Los tractores agrícolas, maquinarias operadas en industrias de la construcción y minera, motocicletas, vehículos eléctricos, los vehículos híbridos con motores de propulsión a gasolina y eléctrico, los vehículos con matrícula de auto antiguo y/o clásico, automotores con matrícula de demostración y/o traslado y aquellos cuya tecnología impida la aplicación de la Norma Oficial Mexicana correspondiente, podrán circular todos los días.

El método para obtener la verificación consiste en una prueba mediante el sistema de diagnóstico a bordo, una prueba dinámica, una estática y otra de opacidad. La regulación que define cual es la prueba a la que deben ser sometidos establece lo siguiente:

- Prueba a través del Sistema de Diagnóstico a Bordo: incluye los sistemas OBD II, EOBD o similares. Aplica en los vehículos automotores en circulación año modelo 2006 y posterior, cuyo peso bruto vehicular sea mayor a 400 kilogramos y hasta 3,857 kilogramos, que usen gasolina o gas natural como combustible de fábrica.
- Prueba Dinámica: aplica para:
 - a) Los vehículos automotores en circulación, año modelo 2005 y anterior, cuyo peso bruto vehicular sea mayor a 400 kilogramos y hasta 3,857 kilogramos que usen un combustible diferente a diesel.

- b) Los vehículos automotores en circulación, cuyo peso bruto vehicular sea mayor a 400 kilogramos y hasta 3,857 kilogramos que hayan sido convertidos para usar otro combustible distinto al de origen.
 - Prueba Estática aplica para:
 - a) Vehículos automotores en circulación con peso bruto vehicular mayor a 400 kilogramos y hasta 3,857 kilogramos y que usen un combustible diferente a diesel; sean de años modelo anterior a 2006.
 - b) Vehículos automotores que utilicen gas licuado de petróleo, gas natural y otros combustibles alternos, con peso bruto vehicular mayor a 3,857 kilogramos, no importando el año modelo.
 - Prueba para Opacidad: destinada a evaluar vehículos automotores que utilicen diesel, sin importar su año modelo o peso bruto vehicular.

A.3 Implicaciones de la contaminación del aire en la salud de la población

Dentro de los múltiples efectos negativos de la contaminación, uno de los más graves es la degradación de la salud en organismos vivos, misma que no se limita únicamente a seres humanos, tanto animales como organismos vegetales sufren los efectos de la alteración de la calidad del aire (CDMX).

Alrededor de 1.3 millones de personas mueren anualmente a nivel mundial como consecuencia de la contaminación atmosférica urbana (Departamento de Salud Pública, 2016) y se estima que el 24% de la carga de la enfermedad mundial y el 23% de todos los fallecimientos pueden atribuirse a factores ambientales (Hurtado Díaz, 2015). Debido a ello, modificar las condiciones ambientales en función de una mayor calidad de vida puede reducir drásticamente las tasas de mortalidad por cánceres pulmonares, enfermedades cerebrovasculares y neumopatías (OMS, 2016) sobre todo porque éstas tienden a agravarse con el tiempo de exposición a la atmósfera contaminada (CDMX).

Ejemplo de las adversidades para la salud causadas por la contaminación es el aumento de propensión de ataques asmáticos en presencia de ozono a nivel del suelo y de enfermedades cardiovasculares por la exposición prolongada a material particulado entre otros apreciables en la siguiente tabla.

Tabla A.5 Efectos de los contaminantes aéreos en la salud

Contaminante	Origen	Efectos nocivos
CO	Producto de la combustión	Tóxico para los humanos, produce anemia y afecta a la oxigenación.
ÓXIDOS DE AZUFRE	Combustión de petróleo y carbono. En su mayoría causado por plantas de electricidad y otros procesos industriales	Contrae los bronquios e irrita garganta y ojos. Se le relaciona con el aumento de muertes por enfermedades crónicas.
ÓXIDOS DE NITRÓGENO	Resultan de la reacción del Oxígeno con el Nitrógeno del aire. Causados por plantas de electricidad	Tóxico para el tejido pulmonar, letal para plantas.
HIDROCARBUROS	Producto de la combustión mayoritariamente de los vehículos a motor y la industria petrolera.	Algunos tipos son letales para las plantas y animales. Provocan complicaciones en el sistema respiratorio.
PARTÍCULAS SUSPENDIDAS	Se originan por la obtención de metales y cemento, elaboración de papel y partículas de aerosoles.	Quedan atrapados en la mucosa y/o penetran el tejido bronquial causando graves irritaciones.
PLOMO	Presente en pintura, polvo y juguetes.	Venenooso, es indetectable al gusto y olfato, causa daño al tejido renal, sistema auditivo y tejido cerebral, afecta el desarrollo cognitivo y produce deformidades en fetos.

<p>OTROS: cadmio, amianto, cloruro de vinilo, benceno, compuestos orgánicos halogenados.</p>	<p>Acumuladores eléctricos, pigmentos, desechos industriales.</p>	<p>Enfermedades cardíacas, arterioesclerosis, modificaciones genéticas, daño óseo y renal, malformaciones fetales y cáncer.</p>
--	---	---

A.4 Impacto económico

Se calcula que el costo anual previsible del cambio climático para nuestro país podría ser de entre 3.5 por ciento y 4.2 por ciento del PIB, en función de la pérdida de producción agropecuaria, menor disponibilidad de agua, deforestación, efectos en la salud y pérdida de biodiversidad.

Según el Instituto Mexicano para la competitividad, anualmente se dan pérdidas en productividad valoradas en \$3,396 mdp en la ZMVM y en cuanto a los gastos generados en materia de salud, éstos están estimados en \$728 mdp al año. (IMCO). De continuar así, el costo económico hasta 2018 puede ascender hasta 20,288 mdp (Muciño, 2016).

Tan solo en 2006 el INEGI establece que el deterioro ambiental equivale a 903,724 millones de pesos, es decir, 149,724 millones de pesos más que en 2003 (Greenpeace, 2009). Dicho costo anual de la destrucción ambiental de México equivalió al 10 por ciento del PIB, que en dinero representaba 754 000 millones de pesos (Greenpeace, 2009).

Referencias de los Antecedentes

Aguilar Garduño, C. (1998). *Dirección General de Bibliotecas*. Recuperado el 07 de 06 de 2016, de UNAM: <http://132.248.9.195/pdbis/265163/Index.html>

ambiental, S. d. (1993). *gob.mx*. Recuperado el 8 de Junio de 2016, de http://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/comercio_exterior/reglas_comercio_internacional/ACAAN.pdf

ambiente, P. S. (10 de Octubre de 2011). *Trabajo y ambiente*. Recuperado el 8 de Junio de 2016, de Trabajo y ambiente: <http://www.trabajoyambiente.com.ar/detalle.php?id=61>

CCA. (2016). *CCA*. Recuperado el 2016, de CCA.

CDMX. (s.f.). *CDMX*. Recuperado el 12 de Junio de 2016, de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aaBhnmI=%27>

CDMX. (s.f.). *SEDEMA*. Recuperado el 2016 de 06 de 2016, de Índice de la calidad del aire: <http://www.aire.df.gob.mx/default.php?opc=%27YaBj%27>

CDMX, M. (2015). *Metro CDMX*. Recuperado el 16 de Junio de 2016, de <http://www.metro.cdmx.gob.mx/operacion/cifrasoperacion.html>

CDMX, M. (s.f.). *Metrobús CDMX*. Recuperado el 16 de Junio de 2016, de <http://www.metrobus.cdmx.gob.mx/beneficios.html>

CDMX, S. (s.f.). *STE CDMX*. Recuperado el 15 de Junio de 2016, de <http://www.ste.cdmx.gob.mx/index.html?page=5&content=38>

circula, H. n. (2016). *Hoy no circula*. Recuperado el 10 de Junio de 2016, de <http://www.hoy-no-circula.com.mx/>

Corrales Gil, M. Á. (2009). *Crónica del Instituto Nacional de Ecología*. México D.F.

Departamento de Salud Pública, M. A. (2016). *OMS*. Recuperado el Junio de 10 de 2016, de http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/health_impacts/es/index1.html

Excelsior. (2016 de Mayo de 28). Avalan plan contra la contaminación. *Excelsior* .

Greenpeace. (2009). *Greenpeace*. Recuperado el 10 de Junio de 2016, de http://www.greenpeace.org/mexico/global/mexico/report/2009/6/destruccion_mexico.pdf

Hurtado Díaz, M. (Febrero de 2015). *Instituto Nacional de Salud Pública*. Recuperado el Junio de 10 de 2016, de <http://www.inegi.org.mx/eventos/2015/Poblacion/doc/p-MagaliHurtado.pdf>

ILCE. (2016). *Biblioteca digital del ILCE, Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa*. Recuperado el 2016, de Biblioteca digital del ILCE: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/097/htm/sec_11.htm

IMCO. (s.f.). *IMCO*. Recuperado el 08 de Junio de 2016, de <http://imco.org.mx/calculadora-aire/>

IMCO. (s.f.). *IMCO*. Recuperado el 16 de Junio de 2016, de http://imco.org.mx/medio_ambiente/nuevos-camiones-menos-contaminantes-retos-y-oportunidades-para-la-modernizacion-de-la-flota-pesada-en-mexico/

IMCO. (2016). *IMCO*. Recuperado el 09 de Junio de 2016, de http://imco.org.mx/medio_ambiente/base-de-datos-global-urbana-de-la-contaminacion-del-aire-2016-via-oms/

INE. (2007). *INE*. Recuperado el 07 de 06 de 2016, de MARCO JURÍDICO E INSTITUCIONAL: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/259/marcojur.html>

INE. (28 de Agosto de 2007). *INE*. Recuperado el 07 de Junio de 2016, de Reconsideraciones:La política ambiental mexicana: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/118/cap9.html>

INECC. (2000). *INECC*. Recuperado el 2016, de INECC: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/658/antecedentes.pdf>

INECC. (12 de Mayo de 2014). *INECC*. Recuperado el 8 de Junio de 2016, de <http://www.inecc.gob.mx/calair-indicadores/526-calair-contingencia>

INECC. (1 de Abril de 2016). *INECC*. Recuperado el 09 de Junio de 2016, de <http://www.inecc.gob.mx/calair-informacion-basica/551-calair-inv-emision>

INECC. (2002). *INECC*. Recuperado el 09 de Junio de 2016, de PROGRAMA PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE ZMVM 2002-2010: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/394/cap1.pdf>

INEGI. (25 de Septiembre de 2015). *INEGI*. Recuperado el 15 de Junio de 2016, de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/sisept/default.aspx?t=mamb202&s=est&c=21691>

INEGI. (30 de Mayo de 2016). *INEGI*. Recuperado el 15 de Junio de 2016, de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/temas/default.aspx?s=est&c=21385>

Institute, C. A. (2013). *Clean Air Institute*. Recuperado el 9 de Junio de 2016, de http://cleanairinstitute.org/cai-f1.php?id_sitio=1&p_idioma=ESP&idp=29

Institute, C. A. (14 de Marzo de 2014). *Clean Air Institute*. Recuperado el 08 de Junio de 2016, de <http://www.cleanairinstitute.org/Noticias/noticias.php?pag=23&sec=315>

Lacasaña-Navarro, M., Aguilar Garduño, C., & Romieu, I. (1999). Salud Pública de México. En M. Lacasaña-Navarro, C. Aguilar Garduño, & I. Romieu. México D.F.

Mihelcic, J. R. (2012). Ingeniería Ambiental. En J. R. Mihelcic, *Ingeniería Ambiental: fundamentos, sustentabilidad, diseño* (pág. 4). Ciudad de México: Alfaomega.

Molina, C. M. (20 de Junio de 2014). *Centro Mario Molina*. Recuperado el 9 de Junio de 2016, de <http://centromariomolina.org/acerca-de-nosotros/quienes-somos/>

Morton Bermea, O., Hernández Álvarez, E., González Hernández, G., Romer, F., Lozano, R., & Berameni Orosco, L. (2009). Assessment of heavy metal pollution in urban topsoils from the metropolitan area of Mexico City. *Journal of Geochemical Exploration*, 218-224.

Muciño, F. (2016). ¿Cuánto le costará a México la contaminación del aire? *Forbes*.

OECD. (30 de Octubre de 2003). *OECD*. Recuperado el 08 de Junio de 2016

OMS. (2016). *OMS*. Recuperado el 07 de 06 de 2016, de Contaminación del aire: http://www.who.int/topics/air_pollution/es/

PNUMA. (1999). *PNUMA*. Recuperado el 08 de Junio de 2016, de <http://www.pnuma.org/AcercaPNUMA.php>

PROFEPA. (2013). *PROFEPA*. Recuperado el 07 de Julio de 2016, de http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/1161/1/mx/acerca_de_profepa.html

Ramos, J. (17 de Mayo de 2011). *Excelsior*.

Rojas Bracho, L. (s.f.). *INE*. Recuperado el 07 de 06 de 2016, de http://www.inecc.gob.mx/descargas/calair/itro_inem.pdf

Rosas, I., Báez, A., & Coutiño, M. (1984). Bacteriological quality of crops irrigated with wastewater in the Xochimilco plots, Mexico City, Mexico. *American Society for Microbiology Applied and Environmental Microbiology*, 1074-1079.

Salud, S. d. (2002). *Secretaría de Salud*. Recuperado el 9 de Junio de 2016, de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/documentos/DOCSAL7103.pdf>

SEDEMA. (s.f.). *CDMX*. Recuperado el 9 de Junio de 2016, de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27Y6BhnmKkYQ==%27>

SEDEMA. (s.f.). *SEDEMA*. Recuperado el 13 de Junio de 2016, de <http://www.sedema.cdmx.gob.mx/sedema/index.php/temas-ambientales/cambio-climatico>

SEMARNAT. (2013). *SEMARNAT*. Recuperado el 07 de 06 de 2016, de Antecedentes: <http://www.semarnat.gob.mx/conocenos/antecedentes>

SEMARNAT. (19 de Diciembre de 2013). *SEMARNAT*. Recuperado el 12 de Junio de 2016, de <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/calidad-del-aire/transporte>

SEMARNAT. (2013). *SEMARNAT*. Recuperado el 16 de Junio de 2016, de http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/inf_inegei_public_2010.pdf

SETRAVI. (2006). *SETRAVI*. Recuperado el 17 de Junio de 2016, de <http://www7.df.gob.mx/wb/stv/estadisticas>

Suburbanos, F. (2016). *Ferrocarriles Suburbanos*. Recuperado el 16 de Junio de 2016, de http://www.fsuburbanos.com/secciones/la_empresa/presentacion.php

sustentable, M. d. (s.f.). *Jefatura de gabinete de ministerios*. Recuperado el 08 de Junio de 2016, de Jefatura de gabinete de ministerios: <http://www2.medioambiente.gov.ar/acuerdos/organismos/onu/onuorpalc.htm>

Yip, M., & Madl, P. (2000). *Air Pollution in Mexico City*. Salzburg, Austria: Project-Study paper, University of Salzburg, Austria (Dr. W. Hofmann) Department of Biophysics and in Cooperation with the.

CAPÍTULO I

CONTAMINACIÓN

I.1 Contaminación

La contaminación está definida como la presencia de una o más sustancias en cuerpos en los que no deberían estar o en concentraciones superiores a las características de dicho cuerpo y que además pueden llevar a efectos biológicos adversos. La alteración inicia por la presencia de impurezas que no son necesariamente contaminantes, es decir todos los contaminantes son impurezas pero no todas las impurezas son contaminantes.

Aunque típicamente al hablar de contaminación se piensa en un contaminante químico, éstos no son los únicos elementos que pueden alterar un cuerpo o ecosistema, ya sea la introducción cambios de otra índole o de otros ejemplares. Determinar cuándo una impureza se convierte en un contaminante requiere de la consideración de factores tanto químicos como biológicos. (Chapman, 2006)

I.2 Tipos de contaminación y contaminantes

Tanto la contaminación como los contaminantes se presentan en diversas formas y a partir de diversas fuentes. Su clasificación puede considerarse bajo más de un criterio, ya sea por el medio en el que aparece o por el tipo de fenómenos que la originan y/o desencadena como se aprecia en la figura 1.1

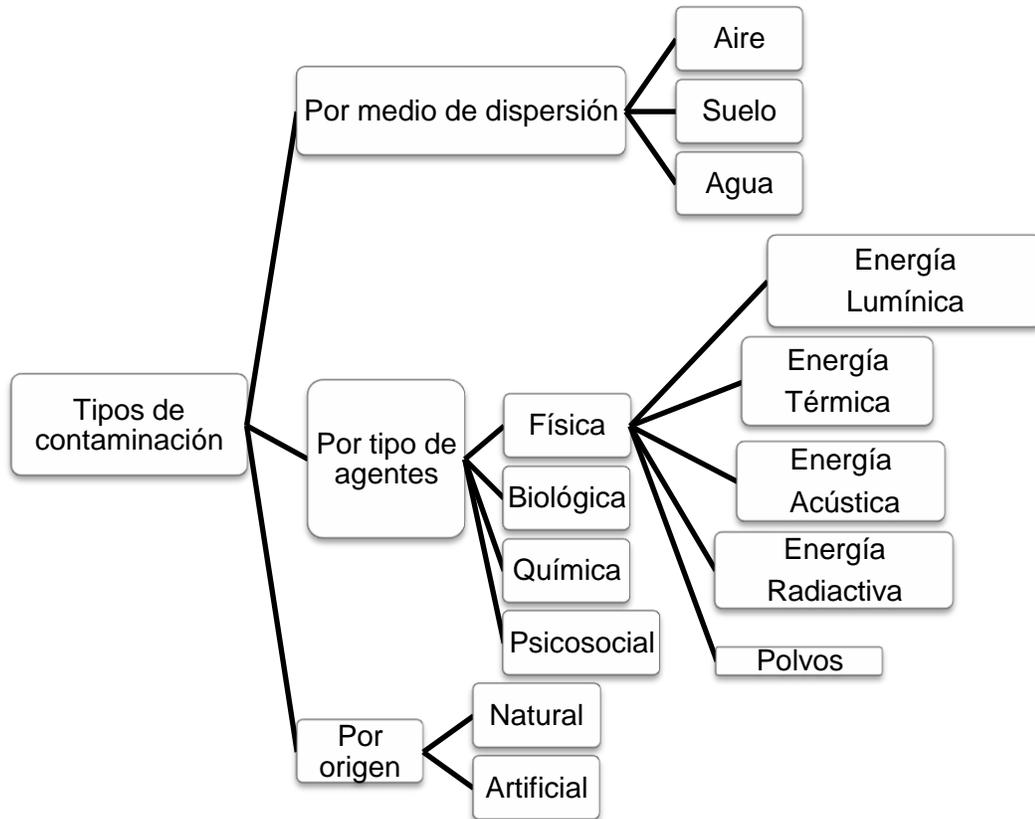


Figura 1.1 Tipos de contaminación

En términos generales puede ser de origen natural, es decir, creada por los procesos inherentes a la fisiología de los organismos vivos y su interacción con los inertes o de tipo artificial, llamada también antrópica que es la generada por las actividades mediante las cuales el hombre manipula la naturaleza, por ejemplo la industria.

Bajo otra perspectiva se suele identificar al agente que provoca el fenómeno a partir de lo cual la contaminación se subdivide en:

- Biológica: es aquella que se da por la presencia de agentes patógenos como bacterias.
- Química: es causado por sustancias incorporadas o excesos de las ya presentes.
- Física: se da por la influencia de energías agregadas ajenas al sistema.
- Psicosocial: es originada por la difusión de mensajes contaminantes a través de los medios de comunicación masiva.

Considerando el medio de dispersión de la contaminación se puede clasificar como contaminación del aire, agua y suelo.

En el caso del agua suele producirse por la creciente descarga de aguas residuales y desechos tóxicos industriales que llevan microorganismos patógenos que pueden llegar a dañar mantos acuíferos subterráneos.

La contaminación del suelo hace referencia a la presencia tanto de microorganismos como de contaminantes inorgánicos como metales pesados que pueden ser absorbidos tanto por organismos vegetales como por lechos subterráneos de agua.

Como contaminación del aire se considera a la presencia de gases y partículas generadas por la quema de combustibles por parte del sector industrial, vehículos a motor, plantas generadoras de electricidad entre otras fuentes, apreciables en la figura 2.2.

En el caso de la combustión de los vehículos, ésta contribuye a la contaminación del aire al arrojar principalmente hidrocarburos a la atmósfera. Contaminantes como el CO, los NO_x, el CO₂, el SO₂, plomo (si el combustible lo contiene), metano y amoníaco (INESEMARNAT, 2009).

El material particulado clasificado como PM₁₀ procede de múltiples fuentes siendo principalmente causado por la quema de combustibles fósiles, la industria química, refinación de petróleo, producción metálica primaria y secundaria, producción cementera, la industria y la manufactura maderera, explotación de canteras, la industria azucarera, la industria textil, erosión, plantas de asfalto e incineradores (SEMARNAT, 2013).

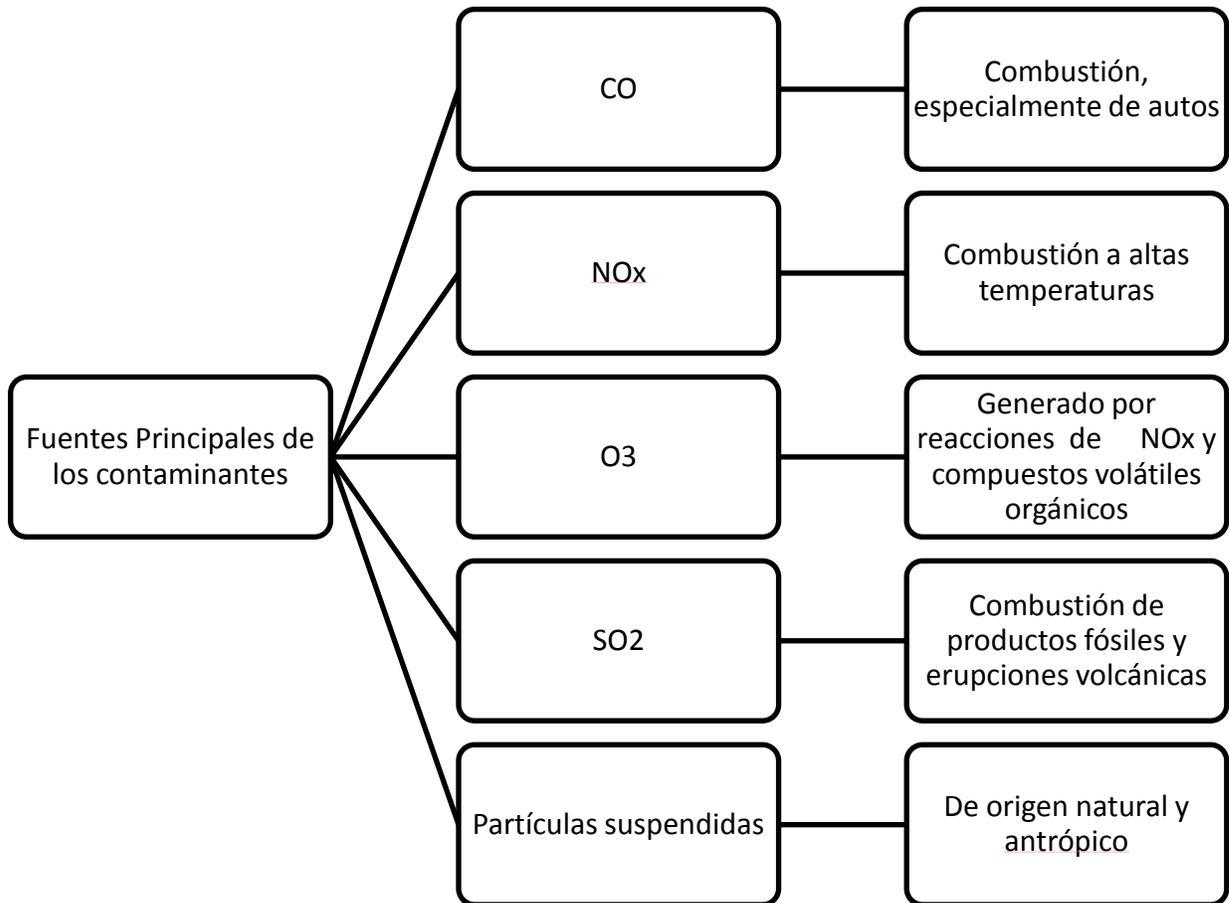


Figura 1.2 Fuentes principales de los contaminantes

Respecto a los contaminantes, éstos se pueden clasificar bajo diferentes perspectivas al igual que en el caso de la contaminación, ejemplo de ello se aprecia en la figura 1.2

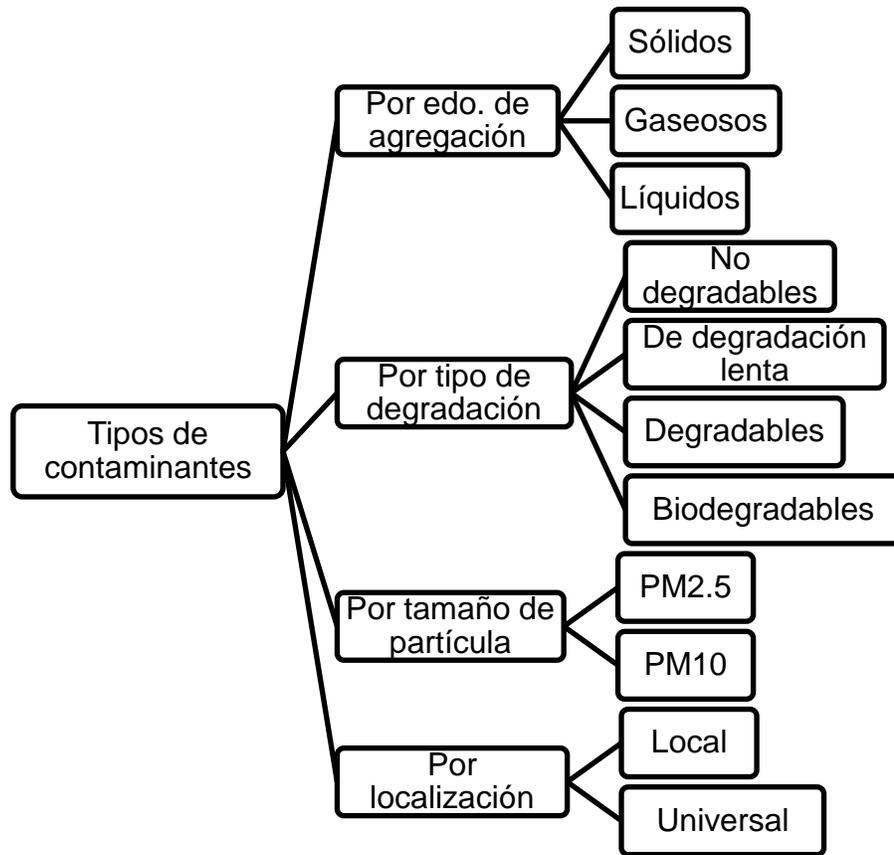


Figura 1.3 Clasificación por tipos de los contaminantes

El estado en el que los contaminantes son desechados al ambiente es un indicador de los principales sectores del ecosistema que son afectados sin embargo no son excluyentes dado que se pueden encontrar contaminantes líquidos en el suelo y así con los demás sustratos y contaminantes (Valverde Valdés & Cano-Santana, 2005).

I.3 Contaminación y contaminantes del aire en la Ciudad de México

Profundizando en el caso de la contaminación aérea, ésta tiene la peculiaridad de tener un alcance que va desde lo más particular hasta lo global. Inicialmente se presenta en interiores, generada por quema de leña y madera por ejemplo, y va agravándose con la presencia de contaminantes a nivel local, con las emisiones de sectores o agrupaciones industriales focalizadas, posteriormente a nivel regional cuando la contaminación es perceptible fuera del área de origen hasta finalmente ser de carácter global (Manahan, 2006).

Los contaminantes aéreos interactúan de diversas maneras en la atmósfera para llegar a una alteración de la composición natural del aire. Aquellos cuya emisión a la atmósfera es directa son llamados contaminantes primarios, ejemplo de ellos son: plomo (Pb), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC), y material particulado.

Los que surgen de reacciones químicas entre los contaminantes primarios y las condiciones atmosféricas son llamados contaminantes secundarios como lo son el ozono (O₃), peroxiacetil-nitrato (PAN), hidrocarburos (HC), sulfatos (SO₄), nitratos (NO₃), ácido sulfúrico (H₂SO₄), material particulado (PM) , entre otros. (SEDEMA, 2013)

Para establecer una clasificación de los contaminantes aéreos se subdividen en contaminantes criterio, contaminantes tóxicos y biológicos. Dentro de los contaminantes criterio se encuentran todos aquellos que tienen una norma mediante la cual ser regulados y sirven como indicadores de la calidad del aire. Los contaminantes tóxicos son los que están presentes en cantidades mínimas en la atmósfera pero representan un grave riesgo para la salud de organismos vivos. Los de tipo biológico son fragmentos de materia viva o en descomposición como es el caso de moho, esporas, restos de células muertas, etc (SEDEMA, 2013).

En la Ciudad de México, el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) es el responsable de la medición permanente de los contaminantes del aire, objetivo que logra gracias a sus más de 40 sitios de monitoreo distribuidos en el área metropolitana, comprendiendo demarcaciones de la Ciudad de México y la zona conurbada del Estado de México.

El Sistema de Monitoreo Atmosférico está conformado por cuatro subsistemas (RAMA, REDMA, REDMET y REDDA), un laboratorio para el análisis fisicoquímico de muestras (LAA) y un centro de procesamiento y difusión de datos (CICA) como se aprecia en la figura 1.4.

Las estaciones encargadas de recolectar la información utilizada por dichas redes son 45 distribuidas a lo largo de la Ciudad de México y en territorios conurbados (SEDEMA, AIRE-CDMX, 2016). De esas 45, 33 están enfocadas al monitoreo de la calidad del aire (consultar anexo A) de las cuales dieciocho están en la Ciudad de México y son: Ajusco, Ajusco Medio, Benito Juárez, Camarones, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Coyoacán, Cuajimalpa, Gustavo A. Madero, Hospital General de México, Iztacalco, Merced, Miguel Hidalgo, Milpa Alta, Pedregal, Santa Fe, Tláhuac, UAM Xochimilco y UAM Iztapalapa.

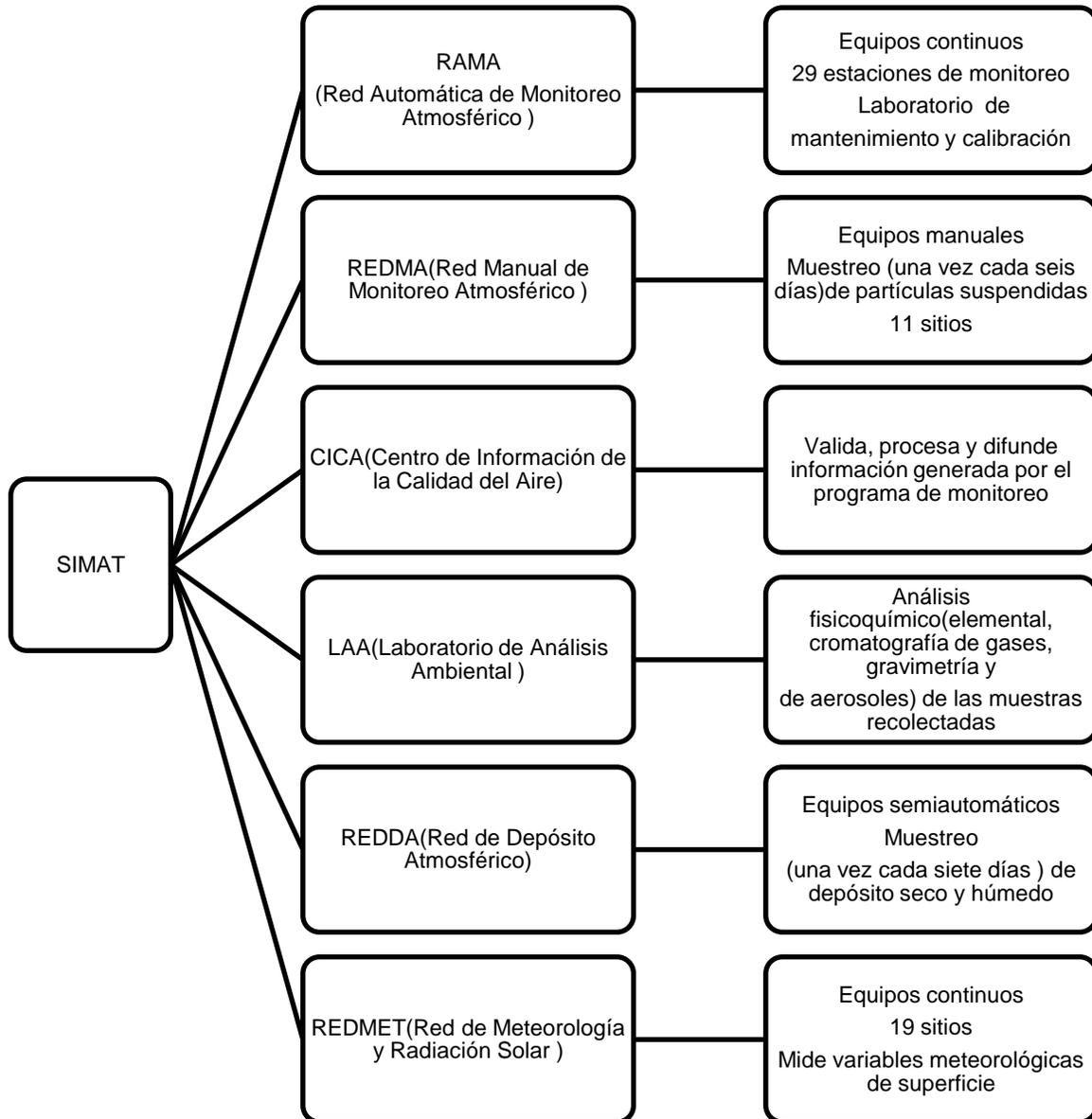


Figura 1.4 Departamentos del SIMAT y características

El SIMAT monitorea los contaminantes criterio que determinan el Índice Metropolitano de la Calidad del aire son los siguientes: ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), las partículas en suspensión (PST, PM₁₀, PM_{2.5}) y el plomo (Pb). La norma que regula el cálculo de dicho índice para la ZMVM es la NADF-009-AIRE-20068 (consultar anexo B). Ésta y las demás normas de los

contaminantes se crean conforme a su impacto en la salud o el medio ambiente designando los valores máximos admisibles para preservar a la ciudadanía.

Los niveles establecidos en esa norma están correlacionados con los establecidos en las normas individuales de los contaminantes criterio. El establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire a nivel federal lo rige la NOM-156-SEMARNAT-2012.

Actualmente se miden de manera continua los siguientes contaminantes criterio (SEDEMA):

Ozono (O₃) : de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM-020-SSA1-2014) se recomiendan concentraciones menores a 0.095 ppm para el promedio de 1 hora, y menores a 0.070 ppm para el promedio móvil de 8 horas (máximo anual), 0.025ppm son el promedio anual.

Dióxido de azufre (SO₂): La Norma Oficial Mexicana (NOM-022-SSA1-2010) de dióxido de azufre (SO₂) recomienda concentraciones menores a 0.110 ppm como promedio máximo de 24 horas y 0.200 ppm como el segundo máximo de los promedios de 8 horas. El límite de exposición crónica es de 0.025 ppm como promedio anual.

Monóxido de carbono (CO): La Norma Oficial Mexicana (NOM-021-SSA1-1993) establece un límite para la concentración en aire ambiente de 11 ppm, para un promedio de 8 horas.

Dióxido de nitrógeno (NO₂): a Norma Oficial Mexicana (NOM-023-SSA1-1993) establece un límite para el dióxido de nitrógeno (NO₂) de 210 ppb para el promedio de una hora, el cual no debe excederse más de una vez al año.

Partículas en suspensión (PST, PM₁₀, PM_{2.5}): la Norma Oficial Mexicana (NOM-025-SSA1-2014) establece los indicadores para partículas suspendidas:

- a) Partículas menores a 10 um: 40 ug/m³, promedio anual; 75 ug/m³, promedio de 24 hora.
- b) Partículas menores a 2. 5 um: 12 ug/m³, promedio anual; 45 ug/m³, promedio de 24 horas.

Plomo (Pb): En México la Norma Oficial Mexicana (NOM-026-SSA1-1993) recomienda un valor máximo permisible de 1.5 µg/m³ (microgramos por metro cúbico) para el promedio aritmético de tres meses, evaluado en muestras de partículas suspendidas totales (PST).

A pesar de contar con normas par la supervisión de la calidad del aire en territorio mexicano, al observarlas frente a los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (Tabla 2.1) podemos percatarnos de que los límites establecidos en México sobrepasan los recomendados para preservar la salud de la población(consultése también el anexo C).

Tabla 1.1 comparativa de valores admisibles de la NOM vs OMS

Contaminantes	Normas en materia de Salud	Normas técnicas	Valor máximo admisible*	Valor máx. admisible según la OMS
PM 10	NOM-025-SSA1-2014		75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, promedio de 24 horas 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24hrs. 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media anual
PM2.5	NOM-025-SSA1-2014	NOM-035-SEMARNAT-1993**	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, promedio 24 horas 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, promedio anual	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24hrs.
O3	NOM-020-SSA1-2014	NOM-036-SEMARNAT-1993	0.095 ppm, promedio horario o 0.070ppm para el promedio de 8hrs =137 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio de 8hrs
NO2	NOM-023-SSA1-1993	NOM-037-SEMARNAT-1993	0.210 ppm, promedio horario=395 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual max.o 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio horario
SO2	NOM-022-SSA1-2010	NOM-038-SEMARNAT-1993	0.110 ppm, máximo promedio de 24 horas= 288.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ o 0.025 ppm, promedio anual	SO2 : 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24hrs.o 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 10min.
CO	NOM-021-SSA1-1993	NOM-034-SEMARNAT-1993	12.595 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio móvil de 8hrs	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para 8hrs
*De acuerdo con las normas de salud				
**Esta norma es para partículas suspendidas totales. No existe una NOM para las metodologías de medición, se siguen las recomendaciones de la US EPA				

Con la finalidad de informar a la población, el SIMAT publica el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire, mejor conocido como IMECA el cual maneja una serie de códigos de color (Tabla 2.2) para expresar la calidad del aire (consultar el anexo A). Se elabora para cinco de los seis contaminantes criterio. Dicho código relaciona los valores alcanzados por los contaminantes en las cinco zonas de la ciudad con las afecciones a la salud que causan al realizar actividades bajo exposición a éstos.

El IMECA de cada zona (Noroeste, Noreste, Centro, Sureste y Suroeste) está representado por el valor más alto de entre los registrados de cada contaminante en las estaciones de monitoreo de la misma.

Los dos primeros intervalos del IMECA se construyeron en base a la mitad y el límite máximo de exposición (anual) designado por la NOM de cada contaminante y para las partículas suspendidas se siguen las recomendaciones del Air Quality Index de los Estados Unidos (SEDEMA, SEDEMA, 2006).

Tabla 1.2 Códigos de expresión de la calidad del aire

IMECA	Indicador de calidad por color	O3 [ppm]	NO2 [ppm]	SO2 [ppm]	CO [ppm]	PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	PM2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
0 – 50	Buena	0.000 - 0.055	0.000 – 0.105	0.000 - 0.065	0.00 – 5.50	0-60	0 – 15.4
51 – 100	Regular	0.056 - 0.110	0.106 – 0.210	0.066 - 0.130	5.51 - 11.00	61 – 120	15.5 – 40.4
101 – 150	Mala	0.111 - 0.165	0.211 - 0.315	0.131 - 0.195	11.01 - 16.50	121 – 220	40.5 – 65.4
151 – 200	Muy Mala	0.166 - 0.220	0.316 - 0.420	0.196 - 0.260	16.51 – 22.00	221 – 320	65.5-150.4
> 200	Extremadamente mala	>0.220	> 0.420	> 0.260	> 22.00	>320	> 150.4

Los valores de la escala IMECA tienen una relación con los valores máximos de exposición (SEDEMA, SEDEMA, 2016):

- Crónica 50 ptos.
- Aguda 100 ptos.
- Alerta 200 ptos.
- Advertencia 300 ptos.
- Emergencia 400 ptos.
- Daño significativo 500 ptos.

Los 150 puntos indican solamente el intermedio entre los cien y 200 ptos.

El cálculo del Índice de la calidad del aire se basa en un algoritmo obtenido con las siguientes ecuaciones:

$$k = \frac{I_{Hi} - I_{LO}}{BP_{Hi} - BP_{LO}} \quad [\text{Ec.1.1}]$$

$$\text{Índice} = [k(C - BP_{LO})] + I_{LO} \quad [\text{Ec.1.2}]$$

Donde k=constante de proporcionalidad

I_{Hi} =Índice correspondiente al límite superior del rango de puntos de quiebre

I_{LO} =Índice correspondiente al límite inferior del rango de puntos de quiebre.

BP_{Hi} = Límite superior del rango de puntos de quiebre al que pertenece la lectura máxima registrada del contaminante.

BP_{LO} =Límite inferior del rango de puntos de quiebre al que pertenece la lectura máxima registrada del contaminante.

C =Concentración máxima redondeada registrada del contaminante

I.4 Metodología e Instrumentos para la medición de la contaminación aérea en la Ciudad de México

Para llevar a cabo las mediciones del IMECA, el SIMAT trabaja en colaboración con la US EPA (United States Environmental Protection Agency) gracias a lo cual se establece el método de referencia o método equivalente que determina cuáles son los equipos aptos para la medición de los contaminantes criterio, además de las condiciones bajo las que se hace de común acuerdo con la Norma Oficial Mexicana.

Tanto los equipos utilizados para la medición de concentraciones de cada contaminante como los métodos de referencia o equivalentes se publican en la norma técnica correspondiente que es una NOM de SEMARNAT.

Tabla 1.3 Métodos de medición de contaminantes

Contaminante	Norma técnica	Método de medición	Descripción del método
Dióxido de azufre (SO ₂)	NOM-038-SEMARNAT-1993	Fluorescencia UV	Método equivalente: medición de la fluorescencia emitida por las moléculas de SO ₂ cuando son excitadas por una fuente de radiación ultravioleta.
Monóxido de carbono (CO)	NOM-034-SEMARNAT-1993	Absorción en el infrarrojo	Método de referencia: medición de la absorción de luz infrarroja por parte del monóxido de carbono en una celda de correlación.
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	NOM-037-SEMARNAT-1993	Quimioluminiscencia	Método de referencia: medición de la luz emitida durante la reacción entre el NO y el O ₃ . La separación de las especies nitrogenadas se realiza a través de la medición diferencial de NO y NO ₂ (previa reducción catalítica). El valor de NO _x corresponde a la suma de NO+NO ₂ .
Ozono (O ₃)	NOM-036-SEMARNAT-1993	Fotometría UV	Método equivalente: absorción de luz ultravioleta en una longitud de onda de 254 nm, la disminución en la intensidad es proporcional a la concentración de ozono de acuerdo a la ley de Beer-Lambert.
Partículas suspendidas PM ₁₀ , PM _{2.5}	No existe. Se siguen las recomendaciones de la US EPA	Gravimetría	Método equivalente: determinación de la masa de partículas presente en un flujo de aire, las partículas son separadas de la corriente y depositadas sobre un filtro colocado en un elemento oscilante, la variación en la frecuencia de oscilación es proporcional a la masa. El tamaño de partícula está determinado por la entrada selectiva y el flujo de muestra.
Partículas suspendidas PM ₁₀ , PM _{2.5}		Atenuación de radiación beta	Método equivalente: atenuación en la intensidad de la radiación beta por las partículas depositadas sobre un filtro continuo.

I.5 Consecuencias ambientales de los contaminantes criterio

Los efectos provocados por la presencia de los contaminantes criterio no se limitan a los generados por las propiedades químicas individuales que poseen, sino que a su vez reaccionan entre sí, trayendo consigo condiciones de deterioro ambiental más complejas.

Dentro de las condiciones que agravan la interacción de los contaminantes está su tiempo de permanencia en la atmósfera, el cual depende de diversas condiciones meteorológicas como presión, altura, temperatura, precipitaciones, etc. En la figura 2.4 podemos apreciar cuál es el tiempo de vida estimado de cada contaminante así como las interacciones negativas del contacto entre contaminantes.

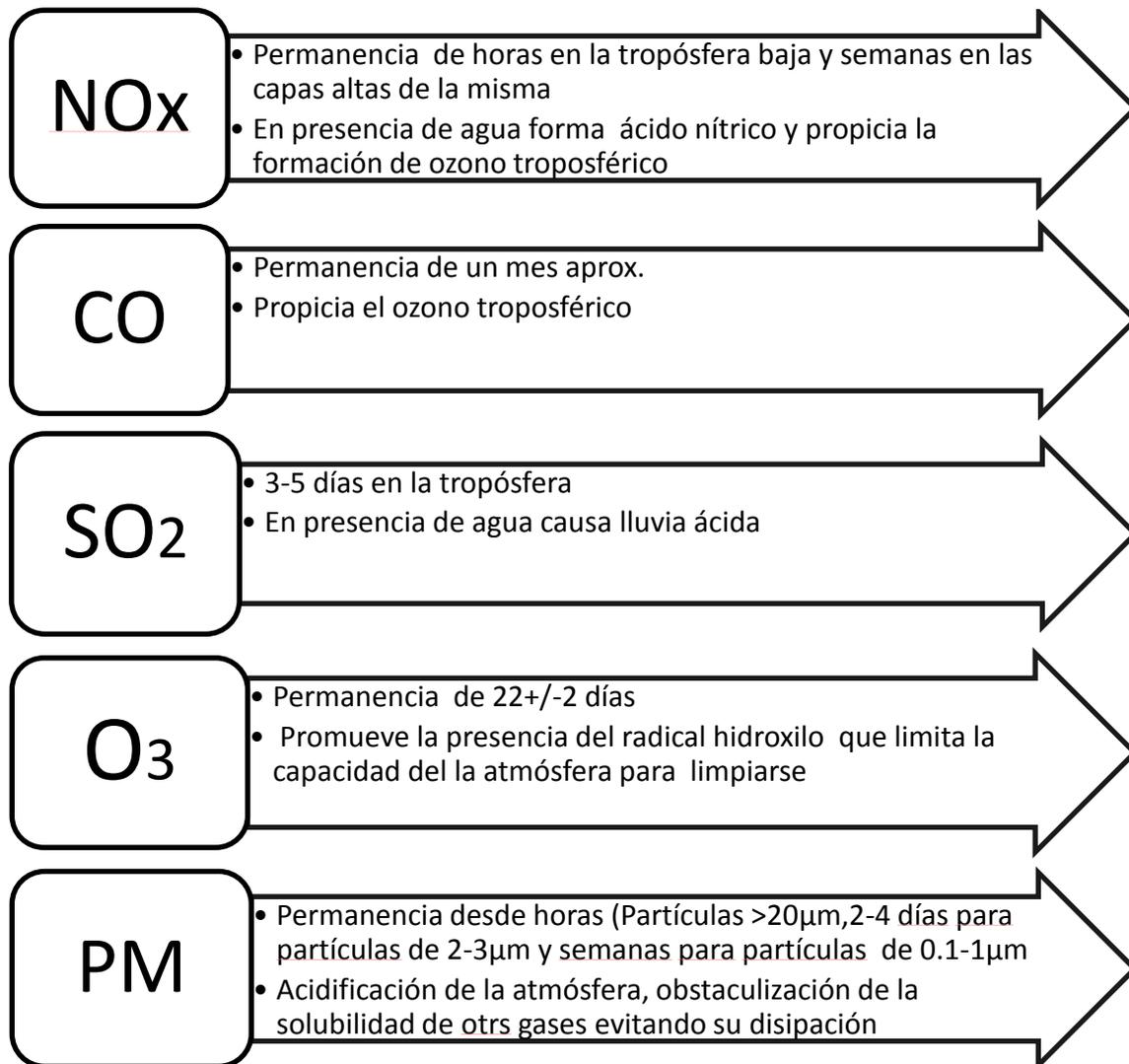


Figura 1.5 Permanencia y consecuencias de los contaminantes en el ambiente

Referencias del Capítulo I

Chapman, P. M. (6 de Octubre de 2006). Determining when contamination is pollution — Weight of evidence. *ScienceDirect* , págs. 492-493.

Cowpertwait, P. S., & Metcalfe, A. V. (2009). *Introductory Time Series with R*. Baltimore: Springer.

Guoqiang Zhang, B. E. (1998). Forecasting with artificial neural networks:. *International Journal of Forecasting* , 35-62.

INE-SEMARNAT. (2009). *Guía Metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas*. Ciudad de México: INE-SEMARNAT.

Madrid, U. A. (7 de Enero de 2004). *UAM Curso de Predicción Económica y Empresarial*. Recuperado el 04 de Octubre de 2016, de https://www.uam.es/docencia/predysim/predysim/2_3_we1.htm

Management, S. S. (2002). *MIT OpenCourseWare*. Recuperado el 2016, de <http://ocw.mit.edu/courses/sloan-school-of-management/15-062-data-mining-spring-2003/lecture-notes/NeuralNet2002.pdf>

Manahan, S. E. (2006). *Introducción a la química ambiental*. México D.F.: Reverte.

Montero Lorenzo, J. M. (2007). *Estadística Descriptiva*. España: Thomson Ediciones Paraninfo, S.A.

Rodríguez, H., Puig, V., Flores, J., & López, R. (2016). *Flow meter Data Validation and Reconstruction using Neural*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2016, de Universitat Politècnica de Catalunya: https://cs2ac.upc.edu/en/news/copy_of_participacio-al-med16

SEDEMA. (2016). *AIRE-CDMX*. Recuperado el 9 de Noviembre de 2016, de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=&dc=%27ZA==>

SEDEMA. (29 de Noviembre de 2006). *SEDEMA*. Recuperado el 5 de Octubre de 2016, de <http://siga.jalisco.gob.mx/assets/documentos/normatividad/nadf-009-aire-2006.pdf>

SEDEMA. (24 de Junio de 2013). *SEDEMA*. Recuperado el 30 de Junio de 2016, de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27YaBj%27>

SEDEMA. (2016). *SEDEMA*. Recuperado el 31 de Julio de 2016, de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=&dc=%27aQ==>

SEMARNAT, I. &. (2013). *Guía metodológica para la estimación de fuentes fijas*. Ciudad de México: INECC-SEMARNAT.

Shim, J. K. (2000). En *Strategic Buisness Forecasting: The Complete Guide to Forecasting Real World Company Performance* (págs. 29-43). St. Lucie Press.

Tolmos Rodríguez-Piñero, P. (2016). *Universitat de Valencia*. Recuperado el 2016, de <http://www.uv.es/asepuma/X/J24C.pdf>

Universidad Carlos III de Madrid, L. d. (2012). *Universidad Carlos III de Madrid*. Recuperado el 4 de Octubre de 2016, de <http://www.lab.inf.uc3m.es/~a0080630/redes-de-neuronas/perceptron-multicapa.html>

Valverde Valdés, T., & Cano-Santana, Z. (2005). *Ecología y medio ambiente*. Ciudad de México, México: Pearson Education.

CAPÍTULO II
MODELOS DE PREDICCIÓN
DE SERIES DE TIEMPO

II.1 Series de tiempo

En estadística se llama serie de tiempo a una colección de observaciones x_t registradas en un tiempo t . Los objetivos de analizar el comportamiento de las series de tiempo son principalmente la descripción simplificada del fenómeno, de las relaciones de la variable en cuestión con otras y la predicción de los valores de la serie (Davis).

Las series de tiempo presentan tres componentes principales: tendencia, variación estacional y variación cíclica (Statistics, 2008).

Se entiende por tendencia al incremento o disminución de los valores de la serie durante periodos largos sin que necesariamente tengan un comportamiento lineal.

En cuanto a las variaciones estacionales y cíclicas, cabe mencionar que la estacionalidad se da en periodos fijos y conocidos mientras que la variación cíclica no tiene un periodo fijo (Hyndman & Athanasopoulos, 2013).

En el caso de que una serie de tiempo no posea tendencia, es decir, que no se vea afectada por la selección de cierto punto en el tiempo como su origen se le llama estacionaria y presenta estabilidad en los datos que la conforman.

El proceso de para predecir el comportamiento de una serie de tiempo está conformado por diversas etapas, mismas que podemos apreciar en la figura 3.1 Es importante a su vez definir tanto el horizonte como el intervalo de predicción que son los periodos que se busca predecir y cada cuánto se elaborarán las proyecciones, respectivamente.

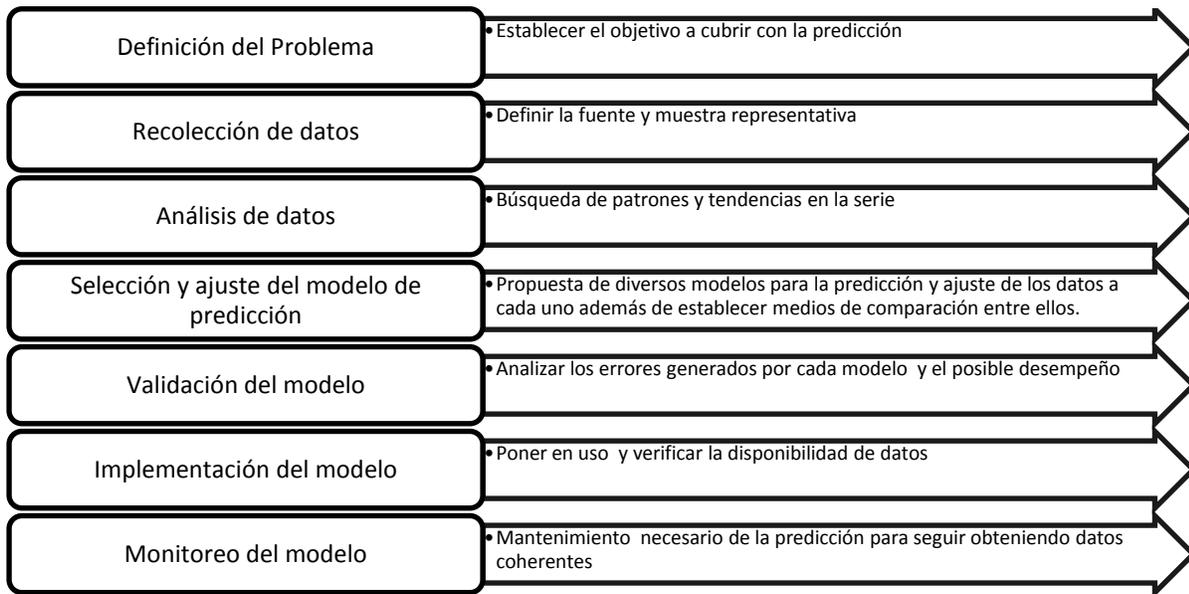


Figura 2.1 Proceso de predicción de series de tiempo

Para el análisis de las series de tiempo se pueden tomar dos enfoque principales, las aproximaciones en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia cuyas características podemos visualizar en la figura 3.2

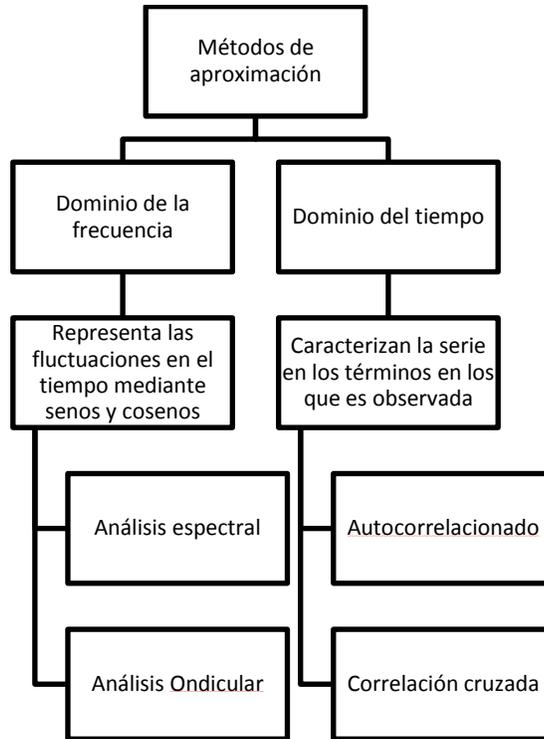


Figura 2.2 Enfoques para el análisis de series de tiempo

A su vez en función de las componentes presentes en la serie de tiempo se pueden elegir diversos modelos para su predicción como los ejemplificados en la figura 3.3

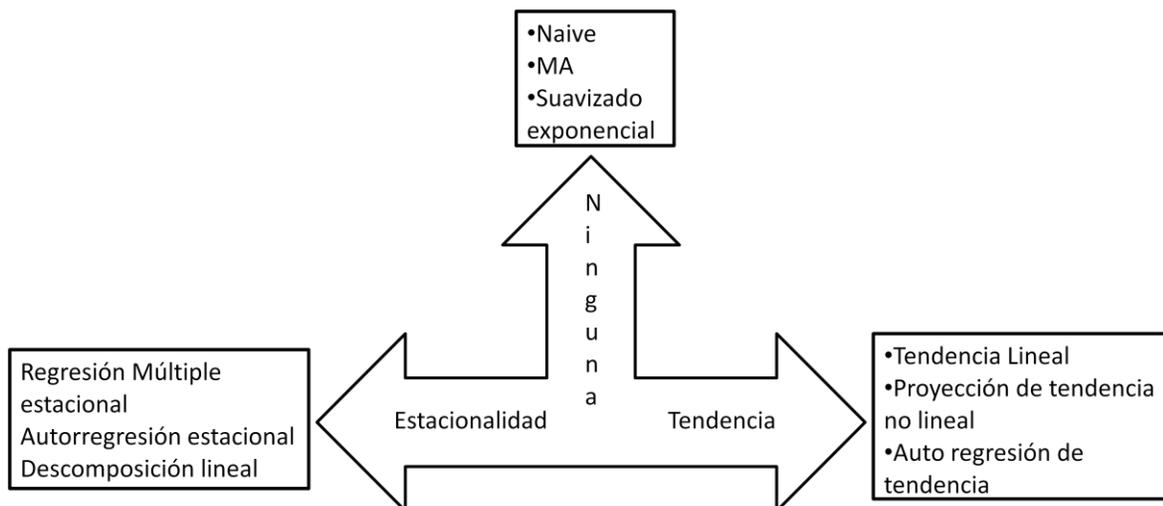


Figura 2.3 Modelos de predicción

II.2 Modelos de pronóstico de series de tiempo

Actualmente se dispone de diversas herramientas de cálculo y procesamiento de datos mediante las cuales hacer proyecciones. De manera conjunta modelos matemáticos y computacionales permiten resolver problemas que, trabajados exclusivamente mediante la estadística y el cálculo tradicional no podrían llevarse a una solución. A continuación se da una breve explicación de los diversos modelos de los que se dispone para la generación de predicciones.

II.2.1 Naive

Comúnmente se denomina como naive al grupo de modelos de predicción que repiten un comportamiento pasado, es decir se asume que lo ocurrido en una circunstancia anterior se repetirá (Madrid, 2004). Es particularmente aplicado a series de tiempo.

El método naive básico utiliza el último valor de la serie de tiempo como valor futuro, es decir

$$\hat{y}_{t+1} = y_t \text{ [Ec.2.1]}$$

Alternativamente existe otra forma del método naive en el cual se considera una tendencia al agregar el más reciente incremento entre periodos

$$\hat{y}_{t+1} - y_t = y_t - y_{t-1} \text{ [Ec. 2.2]}$$

Debido a su simplicidad es viable utilizar en vez del último valor, una media de un periodo, siendo conveniente únicamente en el caso de que no existiera tendencia o que la serie oscilase alrededor de la media.

Como segunda opción se tiene la eliminación de la tendencia de la serie para realizar la predicción y posteriormente agregar la tendencia nuevamente.

Alternativamente se puede agregar una tasa de cambio en lugar de una variación absoluta siguiendo el modelo

$$\hat{y}_{t+1} = \frac{y_t}{y_{t-1}} \text{ [Ec. 2.3]}$$

En su forma más compleja, el método de predicción Naive se puede encontrar en los modelos de suavizado como el de medias móviles y el suavizado exponencial (Shim, 2000).

Dentro de los modelos desarrollados para el procesamiento de series de tiempo, existen aquellos que conciben a la serie como un conjunto de valores generados por un proceso estocástico, es decir son consideradas variables aleatorias generadas por un proceso desconocido. Se pueden mencionar como miembros de este tipo a los modelos auto regresivos (AR), de medias móviles (MA), integrados (I), así como las combinaciones de éstos (ARMA & ARIMA).

Estos procesos estocásticos se centran en el estudio de sistemas que cambian en el tiempo o en el espacio en función de leyes no deterministas. Debido al carácter dinámico de la serie los datos cuentan con cierta dependencia entre sí, misma que permite el modelado de la serie. Las predicciones obtenidas se hacen en base a la información de la serie misma.

Para comprender la estructura de los modelos mixtos es preciso conocer las características de los sencillos, es decir AR, I y MA por separado.

II.2.2 Modelo Auto Regresivo

El modelo auto regresivo o AR, llamado así por la similitud de su modelo matemático y aquel correspondiente a la regresión lineal, se utiliza en la obtención de una observación determinada en base a ya sea uno o dos datos previos a ésta, dependiendo si es de primer o segundo orden respectivamente, de modo que puede ser de orden p y el dato más reciente de la serie es el resultado de una suma ponderada de las p observaciones previas considerando además un margen de error (a_t). La ponderación de la influencia que tiene un valor sobre el siguiente se hace a través de un parámetro ϕ . La representación matemática del modelo AR es la siguiente:

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \phi_3 Y_{t-3} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + a_t \text{ [Ec. 2.4]}$$

Donde las variables de tipo independiente Y_{t-p} son valores en periodos anteriores de la propia variable dependiente por lo cual puede decirse entonces que en el modelo auto regresivo las variables explicativas son la misma variable dependiente en su forma retardada (García Martos & Antoni). Cabe mencionar que éste modelo no es exclusivamente estacionario.

II.2.3 Modelo de Medias Móviles

En este modelo la principal característica es que la variable dependiente no está en función de valores pasados de sí misma sino de los valores pasados residuales, es decir los del error, mismos que se ponderan por el grado de influencia entre sí (Θ). Su modelo matemático es el siguiente:

$$Y_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \text{ [Ec. 2.5]}$$

A modo simplificado puede decirse que busca realizar el pronóstico del siguiente valor futuro de una serie construyendo una serie a partir de la media de una previa, añadiendo un valor nuevo y eliminando simultáneamente el más antiguo conforme va arrojando los pronósticos. Se aplica óptimamente a series sin tendencia y sin estacionalidad, sin embargo se puede adaptar a series con estos componentes si se añaden coeficientes de estacionalidad (Stone), 2004)

II.2.4 ARMA

El nombre del modelo parte del término en inglés Autoregressive Moving Average o Auto regresivo de medias móviles y es un modelo mixto que combina las propiedades del modelo auto regresivo y el de medias móviles. Dado que comparte las características de ambos métodos la variable dependiente ahora está en función tanto de los valores previos de sí misma como de los valores previos del error. La representación matemática es justamente la unión de las representaciones matemáticas de los modelos de partida:

$$Y_t = \varphi_1 Y_{t-1} + \varphi_2 Y_{t-2} + \varphi_3 Y_{t-3} + \dots + \varphi_p Y_{t-p} + a_t + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q}$$

[Ec. 2.6]

II.2.5 ARIMA

Denominado así por sus siglas en inglés Autoregressive Integrated Moving Average. Utiliza como modelos de partida al auto regresivo, al de medias móviles y al modelo No Estacionario de Corrido Aleatorio.

La particularidad del modelo no estacionario de corrido aleatorio es que los errores se suman o se integran respecto al tiempo, propiedad que expresa la existencia de una tendencia en los mismos.

Si el modelo ARIMA involucra dichos valores de integración entonces estaríamos tratando con procesos estocásticos no estacionarios, sin embargo el presente modelo no sólo trabaja con éstos, sino que es capaz de tratar también procesos estacionarios. Dicha flexibilidad es gracias a que introduce una estabilización para los casos no estacionarios mediante grados de diferenciación.

$$Y'_t = \varphi_1 Y'_{t-1} + \varphi_2 Y'_{t-2} + \varphi_3 Y'_{t-3} + \dots + \varphi_p Y'_{t-p} + a_t + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q}$$

[Ec. 2.7]

Siendo Y' la serie estabilizada.

II.2.6 ANN

Artificial Neural Network o Red Neuronal Artificial es un modelo de procesamiento de datos inspirado en el funcionamiento y aprendizaje del cerebro humano. El cerebro humano está constituido por células llamadas neuronas que a su vez se comunican a través de impulsos eléctricos recibidos por la sinapsis, que es quien controla el efecto que dicho impulso tiene sobre la neurona.

En el caso de una neurona artificial ésta tiene como componentes básicos: la sinapsis, una unión sumadora o sumador, una función de activación y una salida (Management, 2002). La sinapsis se

refiere a uniones que dotan de un peso a los valores de entrada, el sumador adiciona los valores de entrada de modo que puedan ser procesados por la función de activación. La función de activación es aquella que computa los datos para convertirlos en una salida. Se puede decir entonces que se tienen n datos de entrada que son aquellos que va a procesar la red, y dado que por cada entrada hay un peso existen a su vez n pesos, de estos dos se hace un producto punto para evaluar la función de activación y así se obtienen las salidas.

El perceptron es el primer modelo de ANN, se trata de una sola neurona con múltiples entradas, función de activación y sólo una salida, Existen otros modelos como, *back propagation*, *hopfield*, como podemos apreciar en la siguiente figura 2.4.

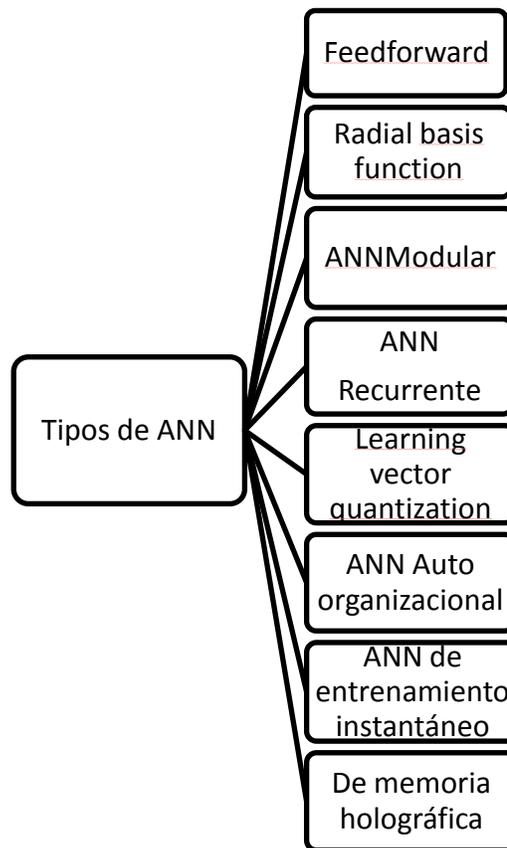


Figura 2.4 Tipos de Redes Neuronales Artificiales

Una ANN puede ser multicapa, es decir, tener varias capas ocultas donde cada capa contara con uno o más perceptrones que pueden conectarse de diferentes formas entre sí (Gurney, 2003).

Para las funciones de activación, anteriormente se utilizaba el perceptrón simple, sin embargo las funciones sigmoidales con la forma

$$g(v) = \left(\frac{e^v}{1+e^v} \right) \text{ [Ec.2.8]}$$

han demostrado ser superiores. Considerando que su arquitectura contempla una entrada, la capa de procesamiento y una salida se puede diferenciar entre redes de una capa y multicapa. La variante del perceptrón con estructura multicapa, es un aproximador universal capaz de tratar relaciones no lineales entre los datos de entrada y salida, siendo actualmente una de las arquitecturas más difundidas (Universidad Carlos III de Madrid, 2012).

Matemáticamente una red neuronal multicapa (específicamente de tres capas) con m neuronas en la capa oculta y una predicción de salida \hat{y}_{t+1} cuya función de activación es sigmoidea se define de la siguiente manera:

$$\hat{y}_{t+1} = f_1(\sum_i^n w_i * x_i) \text{ [Ec.2.9]}$$

$$X_i = f_2(\sum_j^h w_{ij} y_{t-j}) \text{ [Ec.2.10]}$$

Donde f_1 y f_2 son las funciones de activación correspondientes y w describe a los pesos de la red.

Las redes neuronales presentan diversas ventajas respecto a los métodos probabilísticos clásicos cuando se trata de predicciones. Tienen la capacidad de ser alimentados con una serie de entrenamiento mediante la cual aprenden, es decir reconocen los patrones presentes; al aprender son entonces adaptativas y pueden hacer modelos no lineales aún sin una noción previa de la relación entre los valores de entrada y salida. Las redes neuronales pueden inferir una sección faltante de la población e incluso generalizar (Guoqiang Zhang, 1998).

Se ha comprobado en diversos ámbitos que las redes neuronales multicapa proporcionan mejores resultados. En su construcción la entrada alimenta a una primera capa de nodos que ingresan los valores a la red, a la salida de esa primera capa se convierten en valores de entrada para una segunda capa y demás capas ocultas sucesivas hasta alcanzar la capa de salida.

Cuando la red se estructura para predecir un valor numérico es una de las neuronas de la capa de salida la que arroja dicho valor, en el caso de que la red atienda a una clasificación, cada nodo de salida representa a una de las clases.

Para poder obtener el mejor procesamiento posible por parte de una red neuronal, ésta debe ser entrenada, es decir se debe seleccionar cuidadosamente la estructura de la red de modo que al operarla sus resultados sean representativos y por lo tanto apegados a lo esperado. No existe un procedimiento establecido que defina el número de capas y nodos a implementar en la red, usualmente se experimenta mediante prueba y error para definir la arquitectura que proporcione

los resultados más óptimos. Existen investigaciones en las cuales se define la arquitectura más óptima para la red neuronal mediante la implementación de algoritmos genéticos (Rodríguez, Puig, Flores, & López, 2016).

II.2.7 Holt-Winters

Es un método de suavización exponencial (variante de del alisado exponencial doble) para datos que presentan tendencias con estacionalidad (Cowpertwait & Metcalfe, 2009). Se lleva a cabo mediante predicciones o proyecciones a medianos o largos plazos. Este filtro lineal se puede aplicar en dos modalidades: la aditiva y la multiplicativa. Sin importar qué modalidad se aplique, la componente que representa a la variable irregular es introducida de manera aditiva (Montero Lorenzo, 2007).

El modelo multiplicativo tiene la forma

$$Y_t = T_t * E_t \quad \text{[Ec.2.11]}$$

Dado que la tendencia es tratada apeándose de manera aproximada a un modelo lineal

$$T_t = a_t + b_t t \quad \text{[Ec. 2.12]}$$

Al implementar esta interpretación en la Ec. 2.3 obtenemos

$$Y_t = (a_t + b_t t) * E_t + I_t \quad \text{[Ec 2.13]}$$

Donde:

a_t es la ordenada en el origen de la serie

b_t es la pendiente

E_t es el factor estacional multiplicativo

Los valores de éstos se obtienen de las ecuaciones de alisado propias de cada parámetro.

Para la ordenada la ecuación es la siguiente:

$$a_t = \alpha \frac{Y_t}{E_{t-L}} + (1 - \alpha)(a_{t-1} + b_{t-1}) \quad \text{[Ec.2.14]}$$

En el caso de la pendiente, ésta se obtiene mediante:

$$b_t = \beta(a_t - a_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \quad \text{[Ec.2.15]}$$

El valor estacional es proporcionado por la ecuación:

$$E_t = \gamma \frac{Y_t}{a_t} + (1 - \gamma)E_{t-L} \text{ [Ec.2.16]}$$

II.3 Últimas investigaciones relacionadas a la predicción de contaminante realizadas con asistencia de algoritmos computacionales

Dado que el presente trabajo propone la estimación de los contaminantes en la Ciudad de México con base en los algoritmos genéticos y las redes neuronales, se toman en cuenta como antecedentes, trabajos de investigación realizados a nivel mundial y en el mismo escenario que el nuestro. En cada uno de ellos hubo un acercamiento distinto ya sea al seleccionar las variables para construir la población de la que parte la proyección hecha o al momento de elegir el modelo matemático mediante el cual se procesan los datos.

A continuación se muestra en las tablas 3.1 y 3.2 cuáles son las investigaciones previas que han incurrido en el campo de la predicción de contaminantes en el ámbito internacional y específicamente el de la Ciudad de México, así como los contaminantes objetivo y modelos de cada una.

Cabe mencionar también el trabajo del Dr. Gabriel de Icaza del Río que aunque no se enfoca en la predicción de contaminantes hace un análisis del comportamiento del ozono y PM₁₀ en la Ciudad de México y Mánchester de manera conjunta (De Icaza del Río, 2003).

Tabla 2.1 Investigaciones de predicciones de contaminantes a nivel mundial

Año	Título del trabajo de investigación	Contaminante a Predecir	Modelos Usados
1998	Neural network modelling and prediction of hourly NOx and NO2 concentrations in urban air in London	NOx y NO2 concentraciones horarias predichas con un día de anticipación	ANN de perceptrón multicapa
2000	Prediction of PM2.5 concentrations several hours in advance using neural networks in Santiago, Chile	PM2.5 predicciones de cualquier hora del día utilizando el promedio horario del día anterior	ANN multicapa, modelo de regresión lineal y de persistencia

2005	Neural network prediction model for fine particulate matter (PM2.5) on the US-Mexico border in El Paso (Texas) and Ciudad Juárez (Chihuahua).	PM 2.5 promedio horario	ANN de perceptrón multicapa, SMLP y de base radial comparados con regresión lineal y modelo de persistencia
2005	A neural network forecast for daily average PM10 concentrations in Belgium	PM 10 promedio horario con un día de anticipación	ANN
2006	An integrated neural network model for PM10 forecasting	PM 10 predicho con un día de anticipación	ANN multicapa con funciones sigmoidales de activación comparado con modelo de persistencia
2008	Pronóstico de la Concentración de Ozono en Guadalajara-México usando Redes Neuronales Artificiales	O3 concentración máxima del día de interés con un día de anticipación	ANN multicapa con funciones log-sigmoidales de activación

Tabla 2.2 investigaciones de predicción de contaminantes en la Ciudad de México

Año	Título del trabajo de investigación	Contaminante a Predecir	Modelos Usados
1995	Short-term ozone forecasting by artificial neural networks	O3	ANN asocitivos de tipo BAM y HAM
2010	Predicción de contaminantes atmosféricos mediante	O3, PM10, PM2.5, SO2, NO2, CO ,	Clasificador gamma

	el clasificador gamma	NOx	
2011	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	O3, PM10, PM2.5, SO2, NO2, CO	ARIMA

Referencias del Capítulo II

Davis, R. A. (s.f.). *Department of Statistics Columbia University in the City of New York*. Recuperado el 10 de Octubre de 2016, de <http://www.stat.columbia.edu/~rdavis/lectures/Session6.pdf>

De Icaza del Río, G. (2003). *INECC*. Recuperado el 4 de Noviembre de 2016, de http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=377

García Martos, D., & Antoni, E. (s.f.). *Econometría II Grado en Economía y Contabilidad*. Recuperado el 2016, de http://www.est.uc3m.es/esp/nueva_docencia/comp_col_get/lade/Econometria_II_NOdocencia/Documentaci%C3%B3n%20y%20apuntes/TEMA%204_modelos%20autorregresivos.pdf

Gurney, K. (2003). *An Introduction to Neural Networks*. CRC Press.

Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2013). *Forecasting: Principles and Practice*. OText.

Statistics, A. B. (25 de Julio de 2008). Recuperado el 13 de Octubre de 2016, de <http://www.abs.gov.au/websitedbs/D3310114.nsf/home/Time+Series+Analysis:+The+Basics>

Stone), I. L. (2004). *Universidad Autónoma de Madrid*. Recuperado el 14 de Octubre de 2016, de https://www.uam.es/docencia/predysim/predysim/2_3_ficha.htm

CAPÍTULO
III
MODELO PROPUESTO

III.1.1 Red Neuronal Feed-Forward

Debido a su sobresaliente capacidad en labores de predicción de series de tiempo, para concretar el pronóstico de este trabajo se propone la implementación de una red neuronal artificial multicapa de tipo feed-forward. Este tipo de red posee flujo de datos unidireccional, en la que la primera capa oculta está conectada con la entrada y la capa final está conectada a la salida (MathWorks, 2016). Sus capas intermedias son llamadas “ocultas” debido a que no están en contacto ni operan con nada fuera de la red neuronal. Su estructura implica que cada nodo esté conectado a cada nodo de la capa siguiente sin que los nodos de una misma capa estén conectados entre sí (University, 2016). En la figura 3.1 podemos apreciar un ejemplo de este tipo de red neuronal.

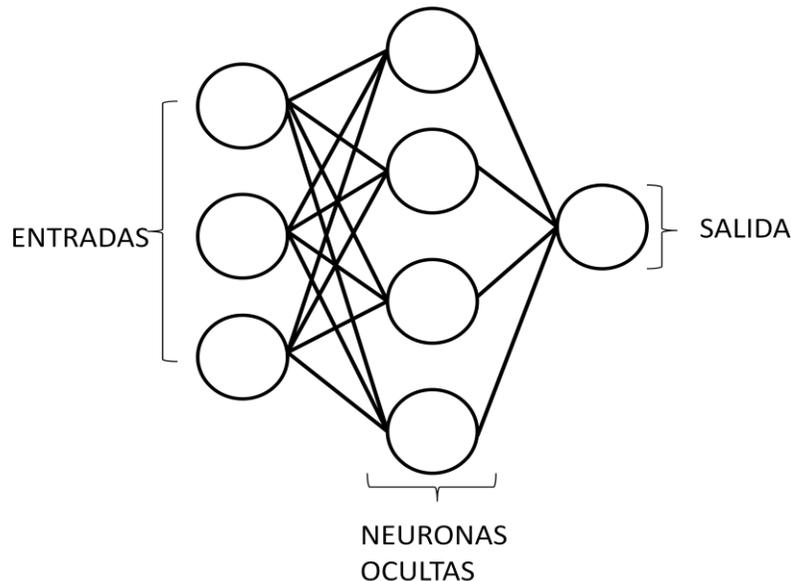


Figura 3.1 Red neuronal multicapa

Debido a que definir la arquitectura de la red neuronal para alcanzar los resultados más óptimos conlleva un alto grado de complejidad, en el presente trabajo se agrega el uso de los algoritmos genéticos para abordar esta fase, el entrenamiento de la red neuronal.

III.1.2 Algoritmos Genéticos

En el campo de la inteligencia artificial se le llama Algoritmo Genético a la serie de pasos para proveer una solución cuyo modelo está basado en la genética (Tolmos Rodríguez-Piñero, 2016). La información que aportan los genes se aleatoriza, posteriormente se busca la compatibilidad entre los datos para ser intercambiados entre los más aptos y dar una solución. Se representa a la

población de datos que son posibles soluciones como cromosomas, procesados en una cadena formada de manera análoga al ADN que se itera en generaciones.

A continuación con ayuda de la tabla 3.1 veremos las funciones que cumplen determinados elementos genéticos a nivel biológico y la función análoga que inspiran dentro los algoritmos genéticos.

Tabla 3.1 Comparación del rol de los elementos genéticos y su análogo

Elemento genético	Función biológica	Función en computación evolutiva
Gen	Unidad de información del ADN que codifican proteínas y ARN.	Bit o bloque de bits
Cromosoma	Estructura de ADN y proteínas que almacena información genética	Cadena de bits candidatos a solución del problema
Genotipo	Información almacenada en los cromosomas	Configuración de bits del cromosoma
Alelo	Variantes existentes de un mismo gen	Valor de cero o uno para los bits de información
Mutación	Cambio en la estructura del ADN	Permutación de un bit en un lugar aleatorio de la cadena
Recombinación	Intercambio de los genes de los padres	Intercambio de información entre cadenas de bits

Para llevar a cabo el proceso se aplican los operadores genéticos a los individuos de la población. Dichos operadores son los siguientes:

- *Evaluación*: Consiste en preparar a los individuos para la fase de selección al asignarles una calificación. La calificación se les es dada en función de la configuración de sus genes.
- *Selección*: Este operador decide quienes entre los individuos de la población son los más aptos para ser padres de la siguiente generación. Existen diferentes métodos para

seleccionar a los individuos padres: regla de la ruleta, ranking, torneo, etc., la selección se realiza en base a su respectiva calificación obtenida.

- *Cruza*: mezcla en parejas de configuraciones de individuos elegidos como padres
- *Mutación*: consiste en alterar genes de los individuos de la nueva generación basándose en probabilidades para decidir que individuos y que genes de estos individuos deben cambiar (mutar) su valor. Este operador se aplica con la intención de expandir el espacio de soluciones y evitar que la búsqueda se concentre en un máximo local.

El uso de dichos operadores dentro del procesamiento en un algoritmo genético se lleva a cabo mediante el siguiente método:

1. Se construye una población P formada por n cromosomas de l cantidad de bits
2. Se identifica la capacidad $f(x)$ potencial de resolución del problema que tiene cada cromosoma
3. Seleccionar un par de cromosomas de la población para que sean padres, los cromosomas pueden ser usados más de una vez.
4. Cruzar el par para formar dos descendientes y en caso de que no se de la cruce copiar exactamente a los padres.
5. Mutar los dos descendientes en cada lugar y colocar a los cromosomas resultantes un una nueva población P'
6. Reemplazar a la población P por P' y comenzar de nuevo el proceso entero con la identificación de capacidad potencial de los cromosomas en la nueva población.

El proceso se repite hasta evolucionar las generaciones marcadas por el usuario, el individuo mejor calificado en todas las generaciones representa la solución más óptima al problema (Mitchell, 1998)

Los individuos que analiza el algoritmo genético se definen como vectores de números reales y éste vector se compone de tres secciones, cada una con una tarea específica.

- I. Define la arquitectura evaluando cuántas lecturas previas se usan como entradas y cuántas neuronas habrá en la capa oculta.
- II. Define el valor de los pesos que van de la entrada a las capas ocultas.
- III. Define el valor de los pesos que van de las capas ocultas a la salida.

Empleando entonces los algoritmos genéticos para entrenar a la red neuronal artificial, se busca optimizar calificando a la mejor solución posible mediante el mínimo MSE

III.1.3 MSE

El error medio cuadrático es una medida estadística que expresa qué tan cercana es una línea ajustada a los valores a los que se pretende acercar. En el caso de procesos de predicción, el MSE

es una representación de cuán precisa es la predicción hecha respecto a su parámetro, es decir las observaciones hechas (Timm, 2007). Se calcula mediante la suma de las diferencias cuadráticas entre los valores de una serie de tiempo y la serie modelada en un mismo instante de tiempo. Cuando se compara un modelo contra la tendencia de una serie, mientras menos sea el valor del MSE más adecuado es el modelo y la función que expresa esta comparación es la siguiente:

$$\min(MSE) = \sum_k^N (y^k - \hat{y}_k)^2 \text{ [Ec. 3.1]}$$

III.2 Datos a analizar

Los datos que la red neuronal artificial procesa son series de tiempo simplificadas de los datos publicados en los reportes anuales del IMECA de 2012, recolectados por la RAMA (Red Automática de Monitoreo Atmosférico) del SIMAT en la Ciudad de México, a través de las estaciones de monitoreo de la zona centro: Merced, Benito Juárez, Hospital General de México e Iztacalco. La selección de la zona centro se justifica mediante el hecho de que respecto al resto de las estaciones, ésta incluye a las encargadas de realizar el monitoreo de los contaminantes de interés y cuyos informes están completos para el periodo de interés.

Los contaminantes contemplados en los reportes utilizados del IMECA son los contaminantes criterio, con excepción de las PM2.5, mismas que son omitidas por la RAMA en sus reportes anuales debido al hecho de que el SIMAT está en espera de que la CAME (Comisión Ambiental de la Megalópolis) desarrolle una metodología mediante la cual normalizar el índice de calidad del aire para PM2.5. Una vez que se haya desarrollado la norma aprobada por las instituciones involucradas se harán públicos los datos de los que para el presente trabajo no pudimos disponer.

El monitoreo se lleva a cabo con el equipo establecido por la NOM correspondiente a cada contaminante siguiendo lo establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos: *US EPA* (consultar Tabla 2.3).

La serie de tiempo utilizada fue construida en base al reporte horario de los contaminantes criterio en la zona centro, a partir de los cuales, conforme a lo establecido en la norma NADF-009-aire-2006 se seleccionó la lectura más alta para definir el índice de calidad del aire. De dichas lecturas se tomaron segmentos de 800 valores para experimentar de los cuales el 70% se usa para entrenamiento y 30% para validación.

III.3 Modelo

El modelo parte de la serie de tiempo de lecturas del IMECA, cuya escala va de 0 a 500 puntos. Estos datos son normalizados de modo en que puedan tomar valores entre cero y uno, gracias a lo cual la escala de valores a abarcar por parte de la red neuronal es menor, además de que se adaptan a una función sigmoide que es la seleccionada como función de activación para el presente caso.

La primera fase a abordar es el diseño de la red neuronal más apropiada para pronosticar el caso de interés. Es decir que los datos recopilados son operados mediante algoritmos genéticos para crear individuos que al ser optimizados mediante la selección natural del algoritmo propongan la arquitectura de red neuronal cuyas predicciones den el mínimo error medio cuadrático respecto a los valores conocidos.

Los 1200 individuos por generación construidos con un vector de valores (10151genes) entre 0 y uno, se seccionan de modo que sus primeros seis elementos se usan para calcular la cantidad de elementos de entrada NI y del séptimo al décimo tercero, determinan las neuronas de la capa oculta NH , esto siguiendo el proceso ilustrado en la figura 3.2.

Para el cálculo, las secciones 1-6 y 7-13 de los individuos se transforman (de manera independiente para cada sección) a valores de uno y cero, asignando un cero a aquellos valores del vector que estén por debajo de 0.5 y un uno a los que están por encima de dicho valor. Los valores binarios se potencian y se suman arrojando así el número de entradas y neuronas ocultas respectivamente.

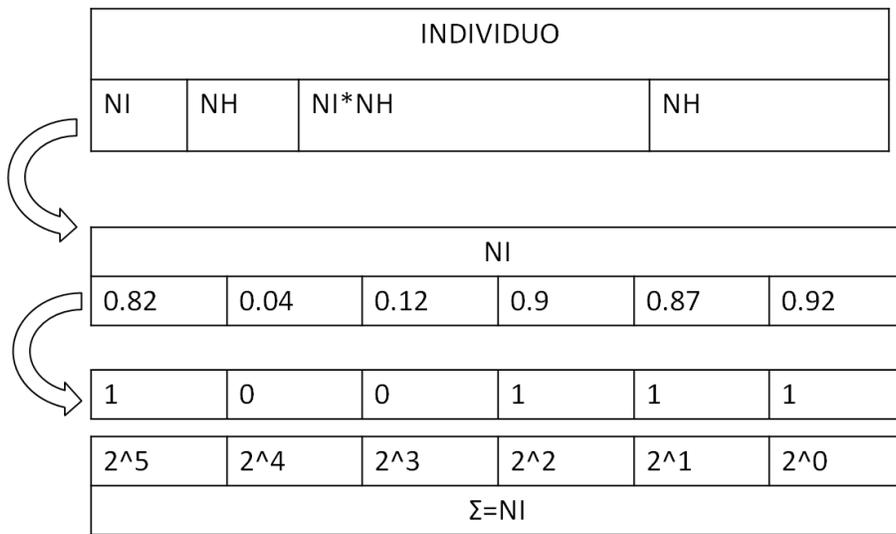


Figura 3.2 Pasos para el cálculo de capas de la red

El resultado de operar $NI*NH$ es el número de conexiones existentes entre la capa de entrada y la capa oculta. De modo que si se tiene un solo perceptrón en la salida, los pesos de la capa oculta a ésta son NH .

La ANN evalúa a cada individuo realizando el pronóstico del 70% de los datos de la serie de tiempo (datos de *entrenamiento*), esto lo hace, tomando como ventana de tiempo NI datos para calcular y_{t+1} , y deslizando la ventana una unidad en el tiempo para calcular y_{t+2} , repitiendo el proceso hasta calcular todos los pronósticos de la serie de tiempo como se aprecia en la figura 3.3.

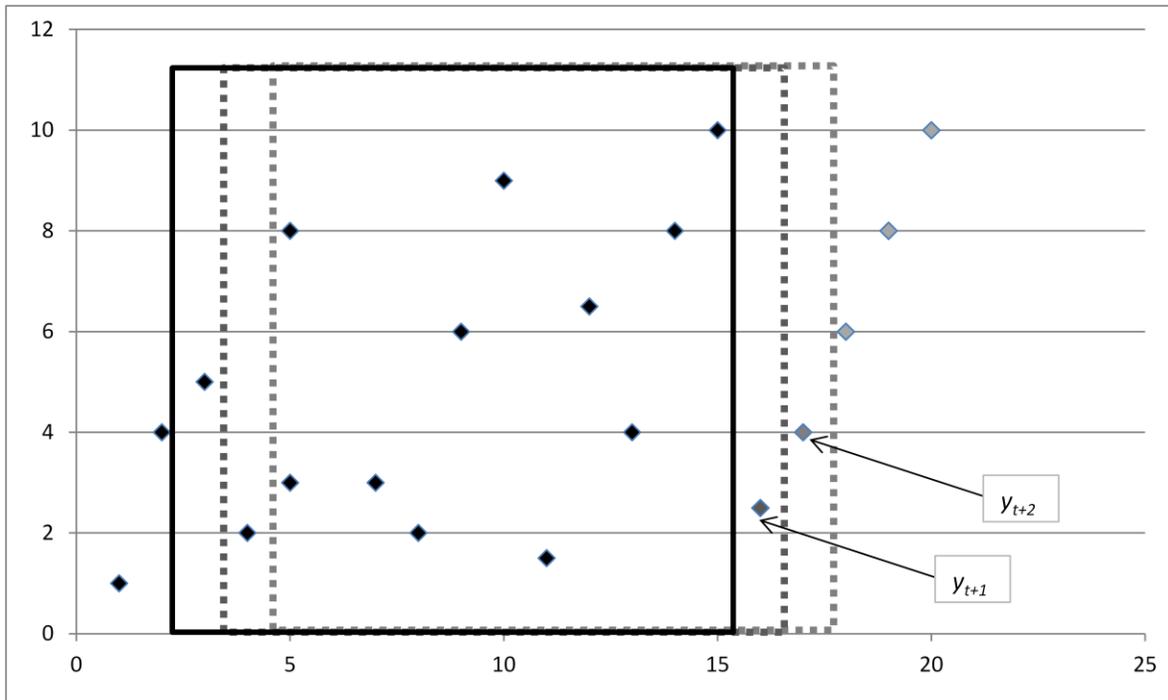


Figura 3.3 Deslizamiento de la ventana para predecir el siguiente valor en la serie

Existe cierto grado de error en los datos pronosticados, este error se calcula aplicando el *error cuadrado medio* (*MSE*, por sus siglas en inglés, Mean Squared Error)

$$MSE = \frac{1}{n-(NI+1)} \sum_{t=NI+1}^n (R_t - y_t)^2, \text{ donde } R, \text{ representa el } \textit{dato real}.$$

El *MSE* es asignado como calificación del individuo; cuando todos los individuos de la generación actual se encuentran evaluados, *GA* continúa su flujo de sus operadores genéticos, y una vez transcurridas todas las generaciones, se tiene al individuo más óptimo, el cual contiene las configuraciones de la *ANN* con el menor *MSE*; Ahora el *SW pronosticador* realiza la etapa de *validación*, en la cual, la *ANN* realiza el mismo procedimiento realizado en la etapa de validación, pero esta vez lo hace tomando el 100% de los datos tomando las configuraciones del individuo más óptimo.

CAPÍTULO IV

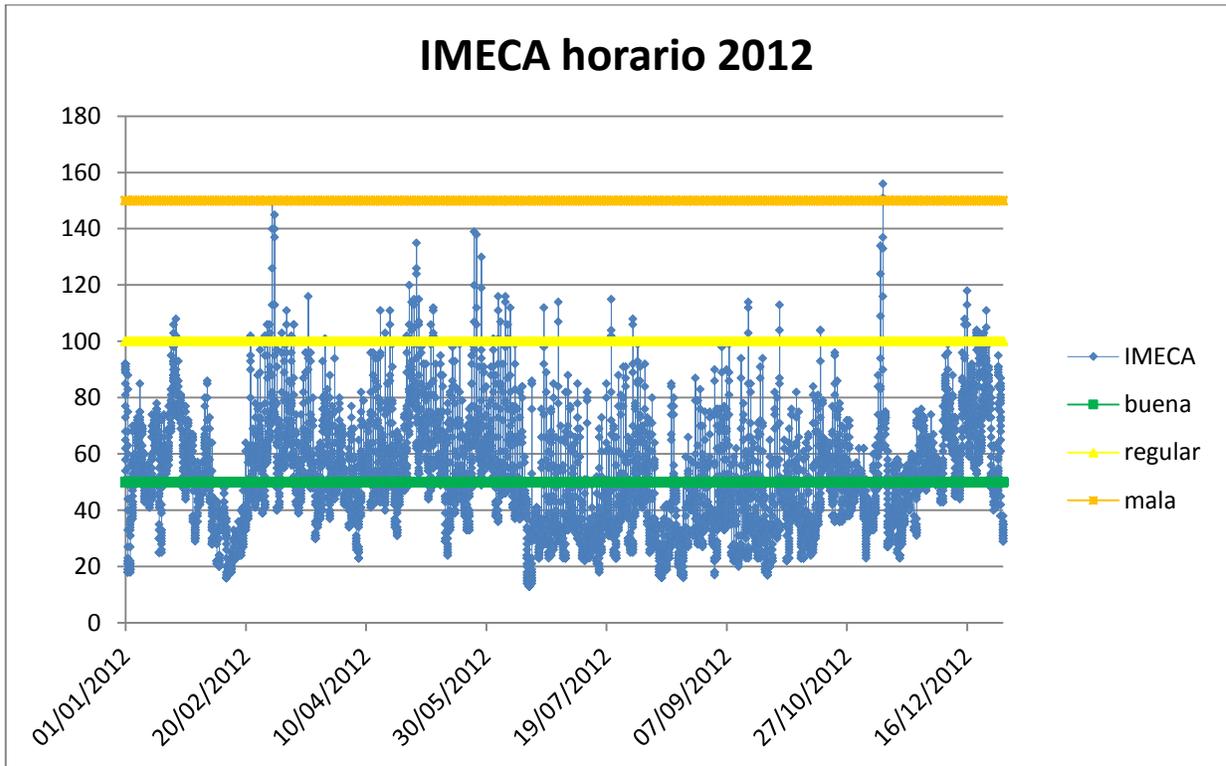
RESULTADOS

IV.1.1 Análisis de datos

Al graficar los valores horarios del IMECA contra el tiempo (gráficas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, y 4.5) podemos apreciar cómo se han rebasado los límites de calidad buena y regular del aire.

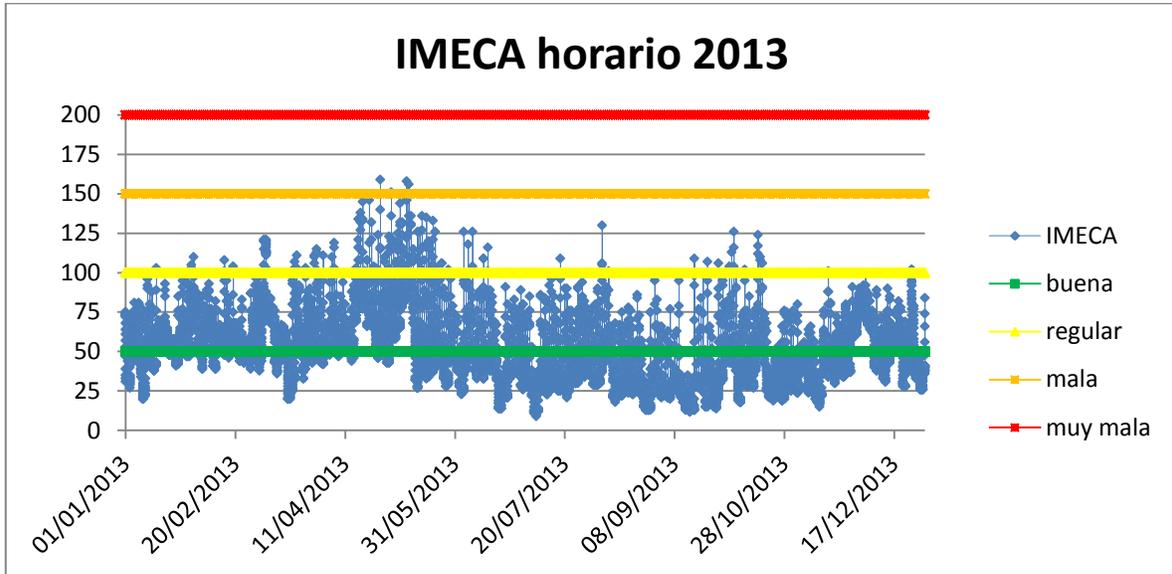
En el caso del año 2012 (Gráfica 4.1) el 1.35% de las lecturas horarias, es decir en 115 ocasiones, el IMECA valoró al aire como de mala calidad. Los contaminantes debidos a los cuales se definieron las lecturas del IMECA fueron Ozono, NO₂ y PM10.

Gráfica 4.1



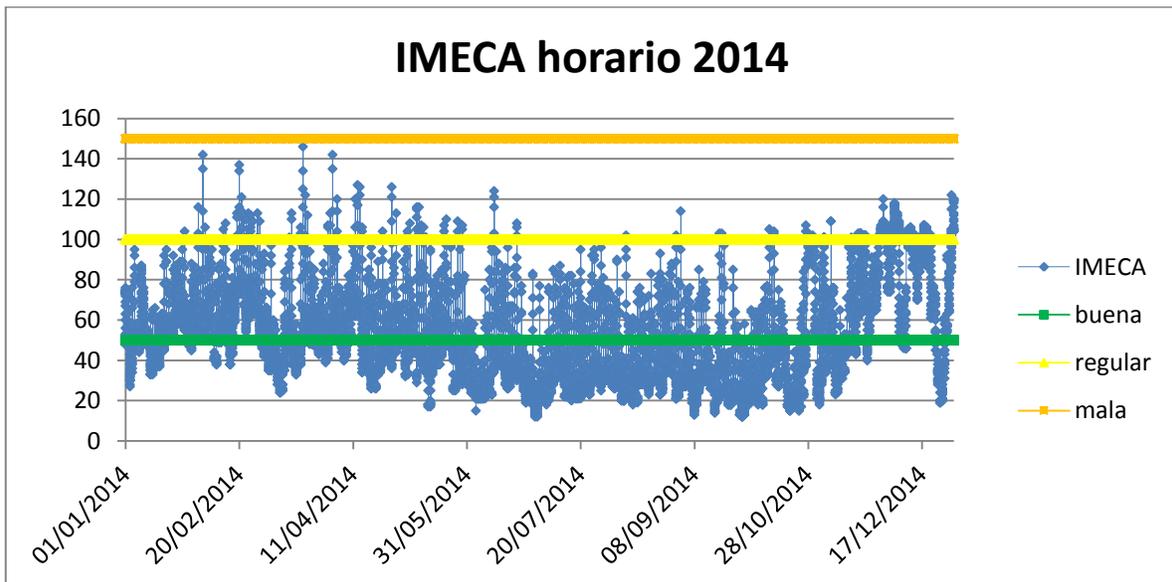
En el año 2013 (Gráfica 4.2) no sólo hubo 190 ocasiones en las que la calidad del aire fue mala, sino que en cuatro casos adicionales se llegó al rango de muy mala calidad. Los contaminantes que definieron las lecturas del IMECA en 2013 fueron. Las PM10 en un 76.73%, el O₃ 21.63% y el NO₂ en un 1.63% de las ocasiones. Los contaminantes cuyas lecturas provocaron que el IMECA alcanzara la mala calidad fueron el ozono y PM10. Cuando se tuvo muy mala calidad del aire fue por la presencia de elevadas concentraciones de ozono.

Gráfica 4.2



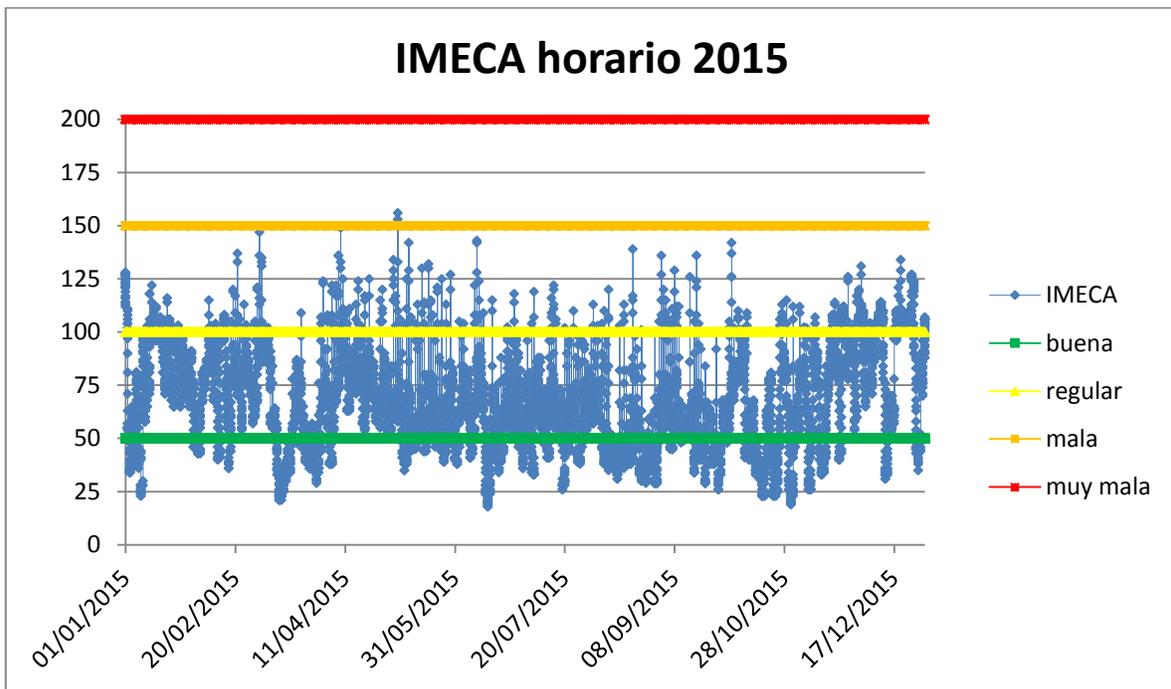
Para el año 2014 (Gráfica 4.3) las lecturas del IMECA en el rango de mala calidad fueron poco más del doble que en 2013, presentándose en 471 ocasiones, causadas por las elevadas concentraciones de ozono y PM10.

Gráfica 4.3



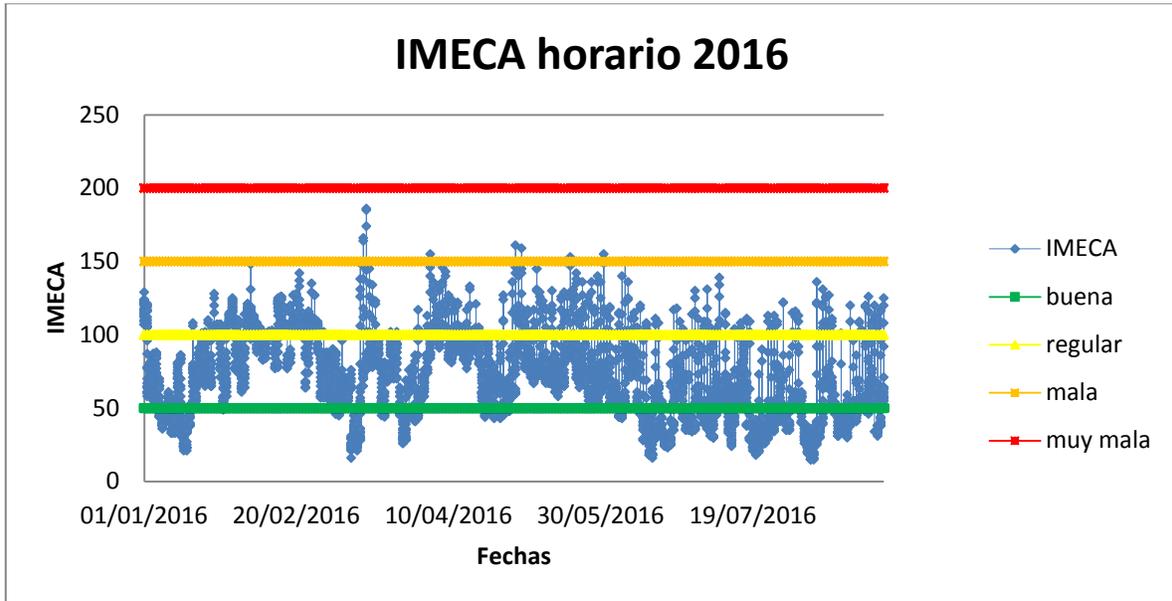
Siguiendo su incremento, para 2015 (Gráfica 4.4) las ocasiones en las que la calidad del aire fue mala ascendieron a 1075, llegando a la muy mala calidad en dos ocasiones. De igual modo que en 2014 el arribo a las lecturas de mala calidad se dio por ozono y PM10. En los casos en que la calidad del aire fue muy mala se debió específicamente a las concentraciones de ozono.

Gráfica 4.4



En el presente año el incremento es considerable, sobre todo porque las lecturas recolectadas son de sólo 8 meses, sin embargo los registros de mala calidad incrementaron un 6.7% comparado con 2014. Igualmente alarmantes son las doce ocasiones en las que se tuvo registro de muy mala calidad del aire. La mala calidad del aire fue ocasionada por ozono, NO₂, CO y PM10. El ozono fue el contaminante cuya presencia provocó la muy mala calidad del aire.

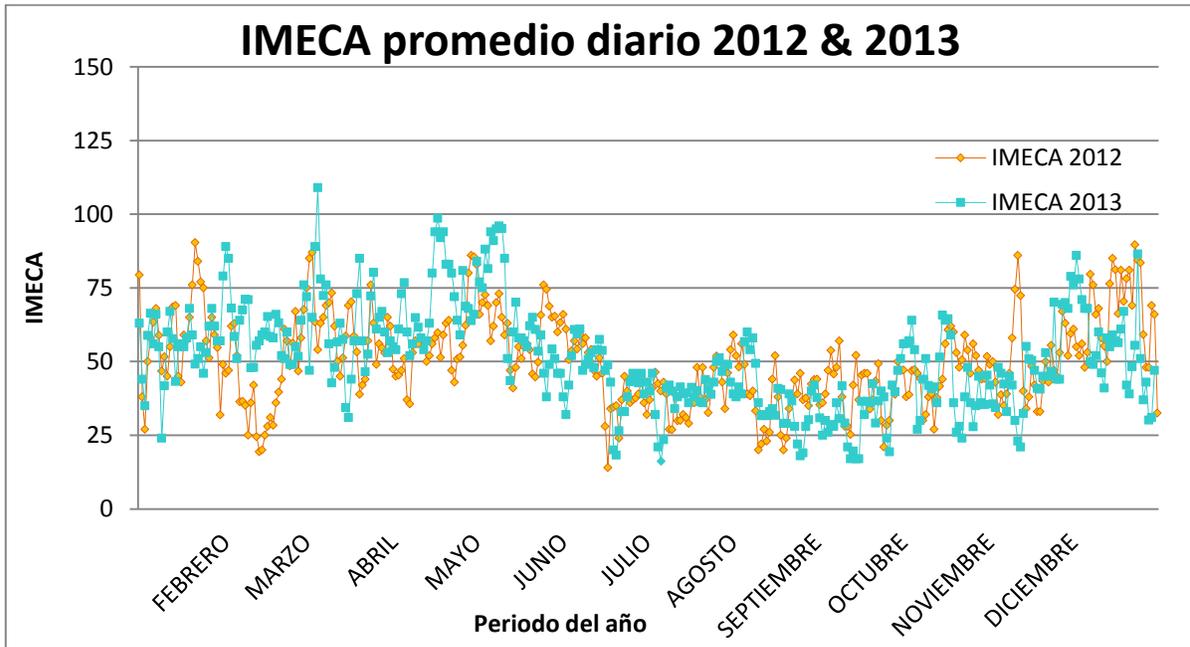
Gráfica 4.5



Las series de tiempo del IMECA promedio diario se graficaron comparando año con año el aumento de las ocasiones de riesgo en el transcurso del tiempo (Gráf. 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9).

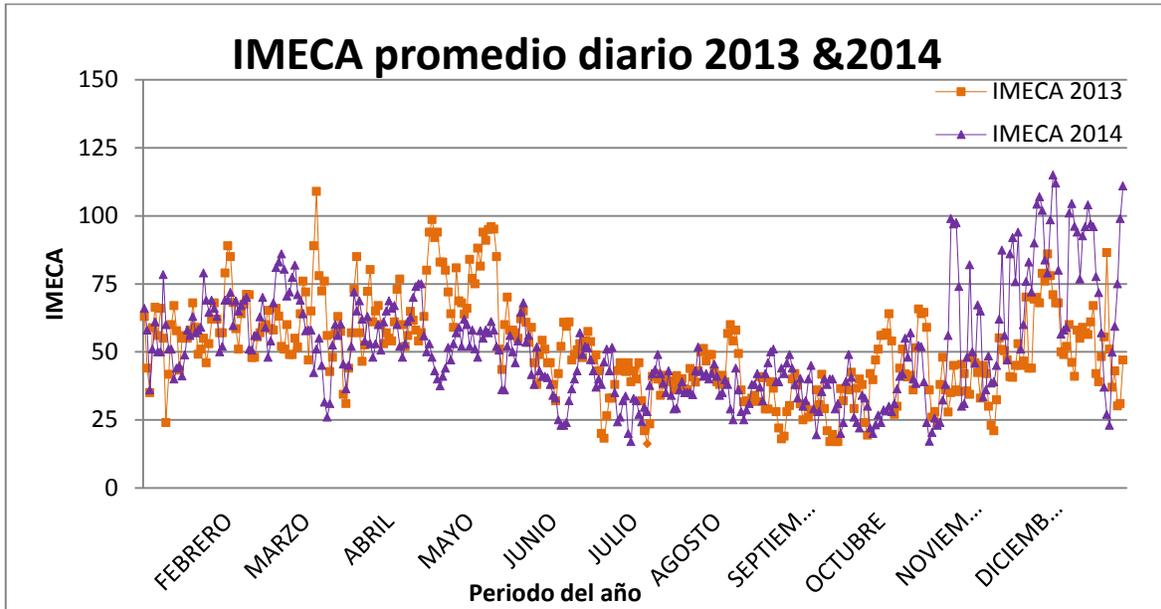
Entre 2012 y 2013 las lecturas horarias de buena calidad del aire se vieron reducidas del 54.48% al 52.44%.

Gráfica 4.6



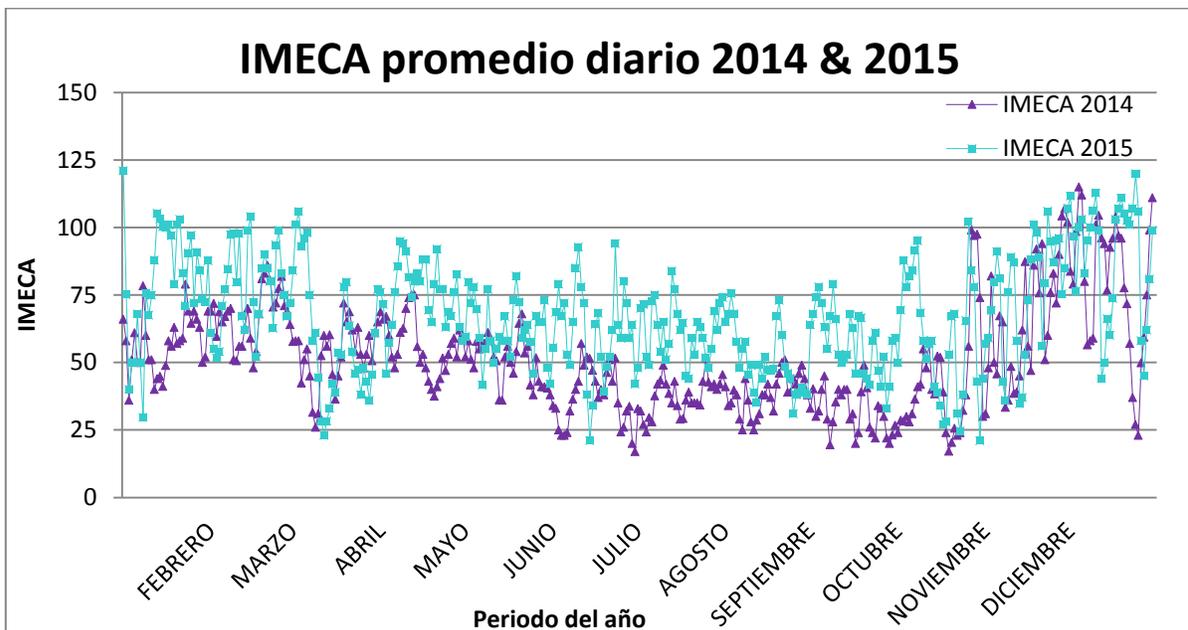
Entre 2013 y 2014 (Gráfica 4.7) las ocasiones horarias en las que se tuvo mala calidad pasaron de representar el 2.16% anual en 2013 a convertirse en un 5.37% en el año posterior.

Gráfica 4.7



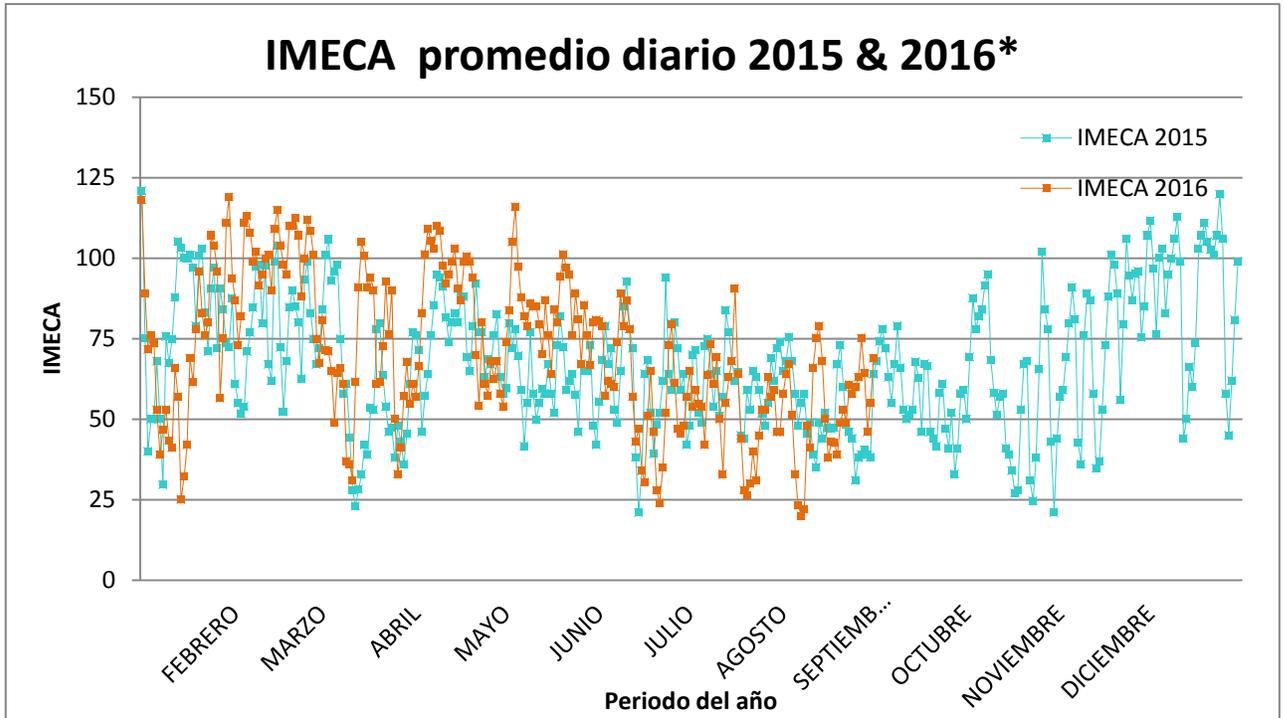
Al llegar al año 2015, 1077 ocasiones fueron de riesgo pasando del 5.37% anual en 2014 al 12.3%.

Gráfica 4.8



Evaluando el año 2016* (en sus primeros dos tercios), las lecturas nocivas registradas son un 19.89% de dicho periodo por lo cual si no llegasen a haber más ocasiones de riesgo en meses posteriores equivaldrían al 13.26% anual.

Gráfica 4.9

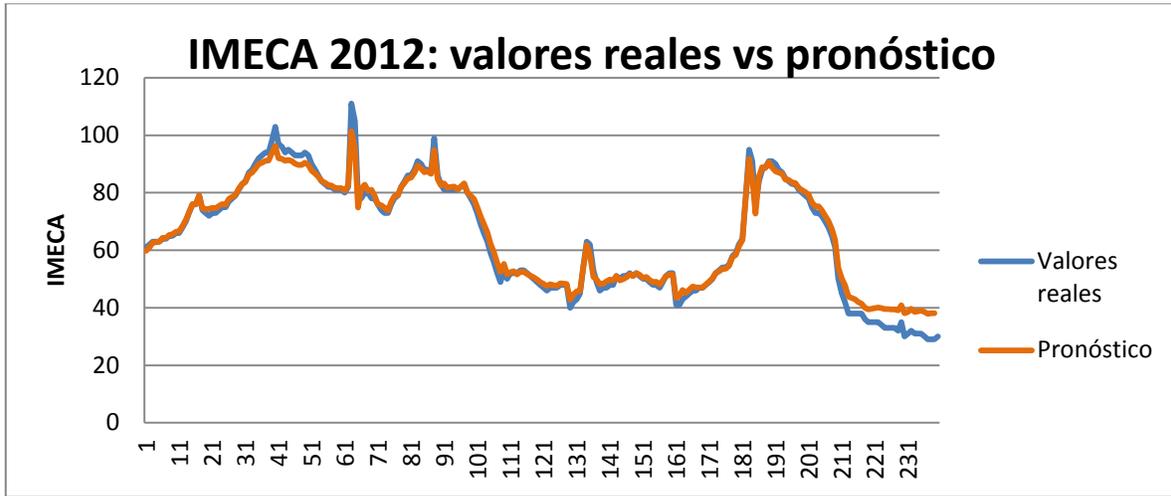


IV.1.2 Análisis del modelo

Para llegar al modelo capaz de predecir con el mínimo error posible, es decir la red neuronal óptima, el algoritmo genético arrojó propuestas de estructura que se fueron probando hasta encontrar la que tuvo el mínimo MSE.

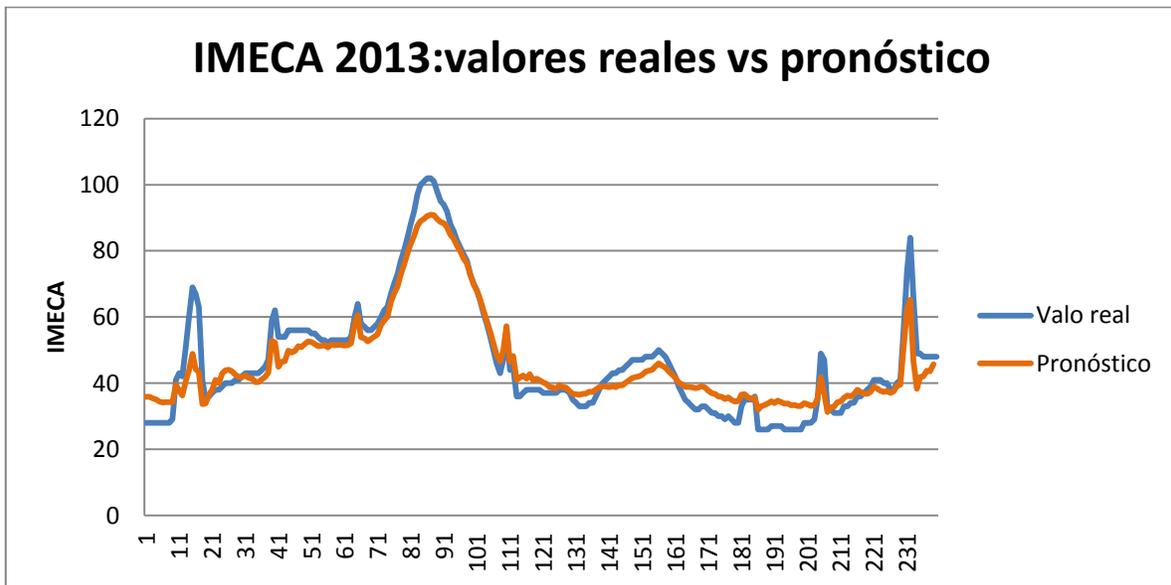
Dentro de los modelos de prueba se generó uno con 76 neuronas en la capa de entrada y 44 en la capa oculta, generando un MSE de 0.0012 en la etapa de entrenamiento y de 12.52 en la de validación, diferencia que se aprecia en la gráfica 4.10.

Gráfica 4.10



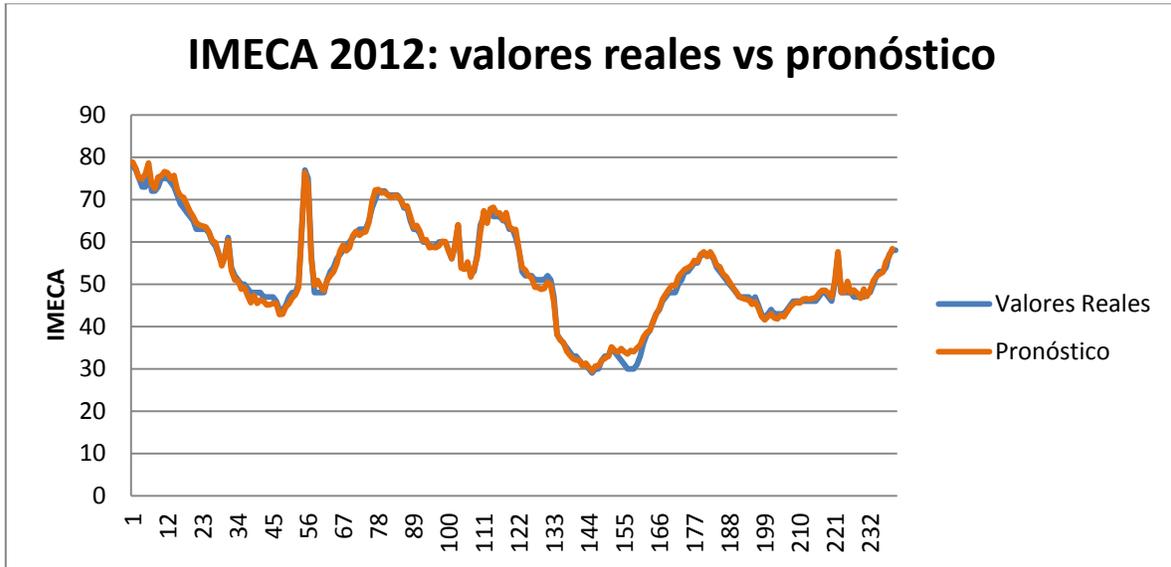
Continuando con las generaciones del algoritmo, se llegó a un modelo compuesto por 81 neuronas en la capa de entrada y 104 en la oculta, con los cual se llegó a un MSE de 0.0018 en la etapa de entrenamiento y de 41.34 en la de validación. Este valor en el error representa una discrepancia entre los valores reales y los pronosticados apreciable en la gráfica 4.11.

Gráfica 4.11



El modelo con la arquitectura más óptima llegó a un MSE de 0.0016 en la etapa de entrenamiento y 1.421 en la de validación, esto gracias a la estructura de 24 neuronas en la capa de entrada y 105 en la oculta. Su apego a los valores reales es fácil de apreciar en la gráfica 4.11.

Gráfica 4.11



IV.2 Conclusiones

Comparando lo establecido en la Norma Oficial Mexicana correspondiente a cada contaminante criterio contra lo establecido por la Organización Mundial de la Salud es evidente que la normatividad mexicana es en extremo permisiva y representa una desventaja tanto para la salud como para la conquista de las metas de reducción de emisiones. Aunada al carácter poco estricto de las normas, la ubicación geográfica de la Ciudad de México es otro factor poco benéfico para el control de la calidad del aire, considerando que por su altitud la mezcla del aire es menos rica en oxígeno y el desalojo de contaminantes se ve entorpecido.

En los registros del IMECA evaluados, se observó que la calidad del aire se determinó como mala o muy mala debido a las concentraciones de PM10 y Ozono, por lo cual deben ser sus fuentes las áreas prioritarias a atender en los planes de mejora de las condiciones del aire. Además se observó que las lecturas pertenecientes a los rangos de mala o muy mala calidad van contundentemente en ascenso.

Debido a que los contaminantes que provocan mayormente las ocasiones de calidad dañina para la vida son el material particulado y el ozono, el sector industrial es un punto importante a vigilar, incluso antes que la flota vehicular. Considerando que al reducir sus emisiones contaminantes, la industria estaría mejorando la eficiencia de su proceso, esto representaría un beneficio económico para las empresas además de ser una vía para que este sector cumpla con sus compromisos de responsabilidad social y de impacto ambiental. Exigir una mayor regulación de las emisiones a nivel industrial no haría peligrar su

productividad económica ni desalentaría a inversionistas del ámbito puesto que los ingresos se verían favorecidos por la mejora de sus procesos.

El modelo que se obtuvo predice con un límite de 24h de antelación, debido a la complejidad del procesamiento de datos, que para tener un horizonte de predicción mayor requiere de un análisis más profundo que plantee, evalúe y valide una nueva arquitectura de red neuronal artificial alimentada de igual modo con datos reales horarios.

Gracias a la implementación de los algoritmos genéticos se pudo comprobar que en el caso de las redes neuronales, tomar más valores de entrada no genera un modelo más representativo del fenómeno estudiado.

De lo anterior también se puede concluir que este análisis es la base de una línea de investigación dedicada a la predicción de la contaminación en el territorio de la Ciudad de México.

IV.3 Trabajo Futuro

A modo de mejorar los resultados obtenidos en esta tesis, se sugiere simplificar las series de tiempo para que en lugar de ser construidas con valores horarios se construyan con lapsos de tiempo más extensos procurando preservar en todo lo posible la representatividad de las lecturas. Incluir más estaciones de monitoreo podría extender el alcance del presente análisis.

De igual modo, construir un modelo capaz de predecir con un mayor periodo de antelación contribuiría enormemente a la formulación de planes de acción bajo un sustento científico.

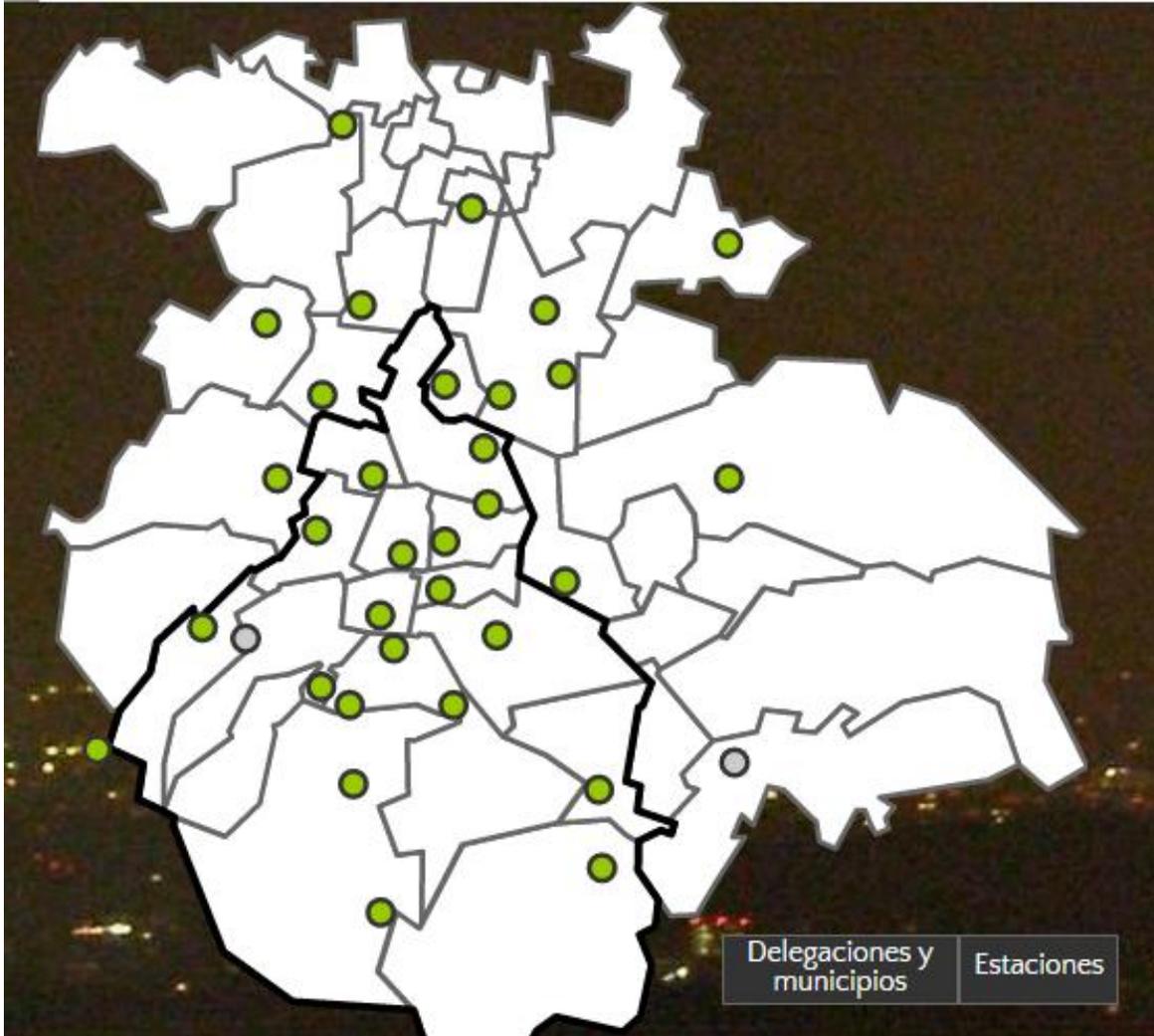
Agregar series de tiempo de variables meteorológicas a la alimentación de la red neuronal contribuiría a una mayor disponibilidad de información para que la red identifique patrones que correlacionen temperatura, precipitaciones, turbulencias y las concentraciones de los contaminantes

Como medida de la fidelidad de los datos, monitorear la calidad del aire mediante un sistema independiente no afiliado al SIMAT sería óptimo.

Finalmente se sugiere analizar los datos proponiendo otro modelo no sólo de red neuronal sino al implementarse otro modelo matemático para la predicción de series de tiempo y efectuar la comparación de su desempeño.

ANEXOS

Mapa de las Estaciones de monitoreo del SIMAT



Obtenido de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmM=%27>

Estaciones de monitoreo dedicadas a la recopilación de datos sobre calidad del aire

Ciudad de México			
Estación de monitoreo	Clave	Zona	Delegación
Ajusco	AJU	SO	Tlalpan
Ajusco Medio	AJM	SO	Tlalpan
Benito Juárez	BJU	CE	Benito Juárez
Camarones	CAM	NO	Azcapotzalco
Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	SO	Coyoacán
Coyoacán	COY	SO	Coyoacán

Cuajimalpa	CUA	SO	Cuajimalpa
Gustavo A. Madero	GAM	NE	Gustavo A. Madero
Hospital General de México	HGM	CE	Cuauhtémoc
Iztacalco	IZT	CE	Iztacalco
Merced	MER	CE	Venustiano Carranza
Miguel Hidalgo	MGH	SO	Miguel Hidalgo
Milpa Alta	MPA	SE	Milpa Alta
Pedregal	PED	SO	Álvaro Obregón
Santa Fe	SFE	SO	Cuajimalpa
Tláhuac	TAH	SE	Tláhuac
UAM Xochimilco	UAX	SE	Coyoacán
UAM Iztapalapa	UIZ	SE	Iztapalapa

Estado de México			
Estación de monitoreo	Clave	Zona	Municipio
Acolman	ACO	NE	Acolman
Atizapán	ATI	NO	Atizapán de Zaragoza
Chalco	CHO	SE	Chalco
Cuautitlán	CUT	NO	Tepotzotlán
FES Acatlán	FAC	NO	Naucalpan de Juárez
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares	INN	SO	Ocoyoacac
Los Laureles	LLA	NE	Ecatepec de Morelos
La Presa	LPR	NE	Tlalnepantla de Baz
Montecillo	MON	NE	Texcoco
Nezahualcóyotl	NEZ	NE	Nezahualcóyotl
San Agustín	SAG	NE	Ecatepec de Morelos
Tlalnepantla	TLA	NO	Tlalnepantla de Baz
Tultitlán	TLI	NO	Tultitlán
Villa de las Flores	VIF	NE	Coacalco de Berriozábal
Xalostoc	XAL	NE	Ecatepec de Morelos

Obtenido de SEDEMA bajo petición al contacto calidadaire@sedema.df.gob.mx

Los intervalos del IMECA están ligados no sólo a los valores establecidos por las normas, mismas que se hacen coincidir con el 100 de la escala de puntos, sino que también tienen un significado en la forma en que dichas concentraciones repercuten en la salud lo cual se puede consultar en la tabla A.1

Tabla A.1 Interpretación de los indicadores del IMECA

IMECA	Indicador de calidad por color	Consecuencia de salud	Significado & Recomendaciones
0 – 50	Buena	Sin riesgo	No existe riesgo para la salud y por lo tanto se pueden realizar actividades físicas al aire libre
51 – 100	Regular	Aceptable	Aunque la calidad sea aceptable personas sensibles pueden presentar síntomas de daño y deben evitar las actividades físicas al aire libre
101 – 150	Mala	Dañina para grupos sensibles	Los niños, adultos mayores, personas que realizan actividad física intensa o con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, deben limitar los esfuerzos prolongados al aire libre
151 – 200	Muy Mala	Dañina a la salud	La población en general debe limitar el esfuerzo prolongado al aire libre debido a la posibilidad de experimentar efectos graves en la salud.
> 200	Extremadamente mala	Muy dañina	Es un estado de emergencia. Toda la población tiene probabilidades de sufrir daños severos.

ANEXO B

SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE

NORMA AMBIENTAL PARA EL DISTRITO FEDERAL NADF-009-AIRE-2006, QUE ESTABLECE LOS REQUISITOS PARA ELABORAR EL ÍNDICE METROPOLITANO DE LA CALIDAD DEL AIRE.

Eduardo Vega López, Secretario del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal con fundamento en lo dispuesto en los artículos 1º, 2º, 15 fracción IV, 16 fracción I, II y IV, 26 fracción I, III, IV y IX de la Ley Orgánica de la Administración Pública del Distrito Federal; 6 fracción II, 9 fracción IV, VII, XLII y XLVI, 36 al 41 y 151 de la Ley Ambiental del Distrito Federal, ordena la publicación de la Norma Ambiental para el Distrito Federal: Que establece los requisitos para elaborar el índice metropolitano de la calidad del aire; la publicación se ordena una vez publicadas en la Gaceta Oficial del Distrito Federal, las respuestas a los comentarios ingresados durante la consulta pública del Proyecto de Norma PROY- NADF-009-AIRE-2006, publicado el 3 de noviembre de 2006, en la Gaceta Oficial del Distrito Federal, por lo anterior, he tenido a bien expedir la siguiente:

NORMA AMBIENTAL PARA EL DISTRITO FEDERAL NADF-009-AIRE-2006, QUE ESTABLECE LOS REQUISITOS PARA ELABORAR EL ÍNDICE METROPOLITANO DE LA CALIDAD DEL AIRE.

ÍNDICE

1. **Introducción**
2. **Objetivo**
3. **Campo de aplicación**
4. **Definiciones**
5. **Disposiciones Generales**
6. **Bibliografía**
7. **Observancia**
8. **Vigencia**
9. **Anexos**

1. INTRODUCCIÓN

La gestión ambiental abocada a atender el problema de la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), requiere de mecanismos para informar a la población de manera adecuada y oportuna sobre los niveles de contaminación y su variación en el tiempo, con el fin de salvaguardar la salud pública. En 1977 la Dirección General de Saneamiento de la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente, desarrolló el Índice Mexicano de Calidad del Aire o IMEXCA. 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. Su fundamento es el Índice Estándar de Contaminantes (Pollutant Standard Index o PSI por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos de América (EUA), un indicador basado en una función lineal segmentada y las normas primarias de calidad del aire¹, y las normas mexicanas de protección a la salud vigentes, de forma tal que establece en 100 puntos el límite de protección a la salud para cada contaminante. A partir de enero de 1986 el IMECA se empezó a difundir a la población a través de diversos medios. Actualmente su difusión comprende la radio, la prensa, la televisión y la Internet (1,2,3,4).

Aunado a lo anterior, no existe un documento oficial que defina el significado y utilidad del IMECA, así como los lineamientos para su generación, uso y difusión, lo que ha provocado una falta de homologación de sus procedimientos entre distintos usuarios. Por otra parte, los resultados de un estudio de percepción social en la ZMVM (5), señalan que la población piensa que la contaminación atmosférica es alta y que el IMECA no refleja la realidad del problema de contaminación atmosférica. Esta actitud representa un obstáculo para lograr que la población comprenda la magnitud del problema de la contaminación atmosférica en la ZMVM o que modifique su relación con la ciudad y el ambiente, y tenga así una participación activa. El estudio concluye también que el IMECA no es una herramienta que motive acciones de protección de la salud.

¹ El PSI es el resultado de la investigación realizada por Thom y Ott en 1975, con más de 50 índices de contaminación existentes en los EUA y Canadá para identificar las características óptimas de un índice de contaminación del aire. En 1976 se propuso el PSI y posteriormente se modificó y adoptó por el Gobierno de los EUA como un índice uniforme de la contaminación del aire. El PSI tiene las siguientes características estructurales: seis variables de contaminación del aire: CO, NO₂, O₃, SO₂, PST y el producto SO₂ x PST; utiliza funciones lineales segmentadas para el cálculo de los subíndices y se calcula de modo máximo, reportando únicamente el subíndice máximo (1).

Con el propósito de mejorar y actualizar un índice con las características del IMECA, éste se debe revisar periódicamente (6) y modificarlo cuando existan cambios en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de salud ambiental o una nueva evidencia de riesgo. El IMECA debe ser información cotidiana para que la población tenga una visión objetiva acerca del problema de la contaminación atmosférica (7) y actúe de forma tal que disminuya los riesgos de exposición a los contaminantes.

Por lo expuesto anteriormente, la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal consideró pertinente elaborar la presente Norma Ambiental para establecer los lineamientos que debe cumplir el IMECA, a fin de que sea empleado como una herramienta veraz, sencilla y oportuna de protección a la salud de la población, con información sobre el riesgo por la exposición a los contaminantes del aire y las acciones de protección que puede realizar. Esto permitirá que la población tenga un mejor conocimiento del grado de deterioro del aire y su efecto en la salud, y que al mismo tiempo se motiven su conducta y conciencia ambientales (8).

La elaboración de esta Norma Ambiental requirió la integración de un grupo de trabajo conformado por investigadores y funcionarios con experiencia en esta materia. Las propuestas y comentarios de este grupo se integraron en lineamientos de uso, obtención, diseño y difusión del IMECA (8,9), los cuales se fundamentan en la evidencia de riesgo que sustentan las NOM de salud ambiental y en la consideración del principio de precaución ante la posibilidad del riesgo que tienen las personas cuando se exponen de forma continua a concentraciones de los contaminantes atmosféricos criterio inferiores a los límites que establecen las NOM. También se considera la elaboración de mensajes y herramientas complementarios al IMECA para prever situaciones adversas de contaminación atmosférica.

En la presente norma se considera que el IMECA debe obtenerse mediante el proceso transparente de la información y de forma numérica mediante algoritmos; que la información que proporcione sea entendible para la población y que comunique los riesgos a la salud asociados a la exposición a los contaminantes atmosféricos criterio.

Para cumplir con lo anterior, la norma aborda los siguientes aspectos, los cuales se explican en el apartado de disposiciones generales:

- (I) Propósito
- (II) Uso de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos criterio para obtener el IMECA
- (III) Comunicación de riesgos y difusión del IMECA

2. OBJETIVO

Establecer los lineamientos para la obtención, el uso y la comunicación de riesgos del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) para el Distrito Federal.

3. CAMPO DE APLICACIÓN

La presente norma aplica en el territorio del Distrito Federal. El IMECA se dará a conocer con base a las zonas de contaminación definidas como Noroeste, Noreste, Centro, Suroeste y Sureste. Su empleo puede extenderse a los municipios conurbados del Estado de México que comprende la ZMVM (10).

4. DEFINICIONES

Para los efectos de esta norma se entiende por:

4.1 Calidad del aire: Características del aire ambiente con relación al tipo de sustancias, la concentración de las mismas y período en que se presentan en un lugar y tiempo determinado.

4.2 Concentración promedio de una hora. Es el promedio aritmético de las concentraciones registradas en una hora.

4.3 Conciencia ambiental: Es la formación de conocimientos, la interiorización de valores y la participación en la prevención y solución de problemas ambientales.

4.4 Condiciones de referencia. Son la temperatura absoluta de 298° K (25° C) y presión barométrica de 101 kPa (760 mm de Hg). Estas condiciones son la referencia para calcular los resultados de los muestreos y análisis de un contaminante en el aire (adaptado de 11).

4.5 Condiciones locales: Son la temperatura absoluta (en °K y su equivalente en °C) y presión barométrica (en kPa y su equivalente en mm de Hg) que se registran en el lugar donde se mide un contaminante atmosférico.

4.6 Contaminación atmosférica. Es la presencia en el aire de uno o más contaminantes o la combinación de éstos (12).

4.7 Contaminante atmosférico. Toda materia o energía en cualquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse y actuar en la atmósfera altera o modifica su composición y condición natural (12).

4.8 Contaminante atmosférico criterio. Término adoptado de la definición que hace la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) para describir a los contaminantes atmosféricos que afectan el bienestar y la salud humana, y que cuentan con criterios para establecer o revisar límites máximos permisibles. Los contaminantes considerados son: ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), plomo (Pb) y partículas suspendidas (adaptado de 13).

4.9 Comunicación de riesgo. Proceso de interacción e intercambio de información (datos, opiniones y sensaciones) entre individuos, grupos o instituciones sobre amenazas para la salud, la seguridad o el ambiente con el propósito de que la comunidad conozca los riesgos a los que está expuesta y participe en su mitigación. Idealmente este proceso es interactivo y permanente

4.10 Evidencia de riesgo. Certeza científica acerca de que se produzca daño a la salud.

4.11 Exposición. Contacto de un ser humano con un agente químico, físico o biológico. Puede incluir la intensidad, frecuencia y duración del contacto, así como la vía de entrada y la dosis (14).

4.12 Gestión ambiental. Conjunto de políticas públicas mediante las cuales una entidad pública propone alternativas de solución a los problemas ambientales.

4.13 Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA). Escala adimensional que sirve para calificar la calidad del aire con respecto a los contaminantes atmosféricos considerados criterio.

4.14 Método de referencia. El procedimiento de análisis y medición descrito en una norma oficial mexicana que debe aplicarse para determinar la concentración de un contaminante en el aire ambiente (11).

4.15 Microgramo por metro cúbico (µg/m³). Es la expresión de concentración en masa del contaminante por unidad de volumen de aire ambiente (adaptado de 15).

4.16 Partes por millón (ppm). Es la relación de un volumen de un contaminante en un millón de volúmenes de aire.

4.17 Peligro a la salud pública: Condición de exposición a sustancias peligrosas en la que se pueden presentar efectos dañinos en la salud de la comunidad.

4.18 Población susceptible. Grupo social con mayor probabilidad de padecer una enfermedad o morir, debido a que es especialmente "vulnerable" como resultado de la interacción de características biológicas, genéticas, ambientales, psicológicas, sociales, económicas, entre otras. (16).

4.19 Promedio móvil de "n" horas. Media aritmética de las "n" concentraciones horarias de un contaminante, a partir de la hora de interés y considerando las n-1 horas consecutivas previas.

4.20 Redondeo: Formato que modifica la información después de una cifra de interés, de tal manera que si la siguiente cifra es 4 ó menor no se considera y no cambia la cifra de interés. Cuando la cifra siguiente es 5 ó mayor, entonces la cifra de interés se incrementa en una unidad (17). Por ejemplo: el redondeo de la cifra 0.1105 es 0.111, y en el caso de la cifra 0.1104 el resultado es 0.110.

4.21 Representación espacial. Referencia a la parcela de aire que caracteriza una estación de monitoreo de contaminantes atmosféricos, en la cual se considera una concentración homogénea del contaminante. La representación espacial se relaciona con el objetivo del monitoreo. En la presente norma se consideran las escalas de representación espacial documentadas en el Código de Regulaciones Federales 50 (CFR, por sus siglas en Inglés), parte 58 del apéndice D ["Network Design for State and Local Air Monitoring Stations (SLAMS), National Air Monitoring Stations (NAMS), and Photochemical Assessment Monitoring Stations (PAMS)"] de los Estados Unidos de América (18).

4.22 Representación física. Referencia a las características físicas que debe cumplir el entorno y la infraestructura donde se establece una estación de monitoreo de contaminantes atmosféricos, con la finalidad de que sus registros sean confiables. En la presente norma se consideran los criterios de representación física documentadas en el Código de Regulaciones Federales 50 (CFR, por sus siglas en Inglés), parte 58 del apéndice E ("Probe and Monitoring Path Siting Criteria for Ambient Air Quality Monitoring") de los Estados Unidos de América (18).

4.23 Representatividad: Medida en que un dato de contaminación atmosférica describe a la población de datos.

4.24 Riesgo. Es la probabilidad de la ocurrencia de un efecto adverso ante la exposición a un agente biológico, químico o físico u otra amenaza (14).

4.25 Zonas de calidad del aire. División espacial de la Zona Metropolitana del Valle de México, con la finalidad de informar los niveles de concentración de los contaminantes atmosféricos criterio, a saber Noroeste, Noreste, Centro, Suroeste, Sureste .

4.26 ZMVM. Zona Metropolitana del Valle de México que integra a las 16 delegaciones políticas del Distrito Federal y 18 municipios conurbados del Estado de México (10).

5. DISPOSICIONES GENERALES

5.1 PROPÓSITO DEL IMECA

5.1.1. El IMECA tiene como propósito *informar a la población de manera clara, oportuna y continua, sobre los niveles de contaminación atmosférica, los probables daños a la salud que ocasiona y las medidas de protección que puede tomar.*

5.2. USO DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS CRITERIO PARA OBTENER EL IMECA

5.2.1 Las concentraciones de los contaminantes criterio O₃, NO₂, SO₂ y CO se expresarán en partes por millón (ppm), mientras que las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} se expresarán en microgramos por metro cúbico (µg/m³). La medición y reporte de ambos tipos de partículas se realiza a condiciones locales de presión y temperatura. En el Anexo 1 se indica la forma como se miden y reportan las concentraciones de partículas medidas en la ZMVM con equipos manuales o automáticos, por parte de la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.

Al momento de elaborar la presente norma el grupo de trabajo mantuvo la discusión acerca de las condiciones en que deben reportarse las concentraciones de los contaminantes. Se considera que esta situación debe motivar una revisión técnica por parte de las autoridades federales y locales, y los centros de investigación. Los resultados de esta revisión técnica pueden dar lugar a la actualización y promulgación de normas técnicas, las cuales se considerarán para actualizar la presente norma ambiental.

5.2.2 La información de los contaminantes para obtener el IMECA, provendrá de las estaciones de monitoreo que cumplan con los criterios de representación física y espacial (vecinal o media en el caso del CO y vecinal o urbana para el resto de contaminantes criterio), en apego a las recomendaciones de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) para instalar estaciones de monitoreo y llevar a cabo la vigilancia de la calidad del aire con fines de información pública (17). En el Anexo 2 se presenta una relación de las estaciones del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, que en el momento de elaborar la presente norma proporcionan información idónea para obtener un índice con las características del IMECA y que cumplen con los criterios de representación física y una escala espacial vecinal o urbana. El mismo anexo también contiene una descripción sobre la cobertura y el tipo de información que provee una estación de monitoreo en función de su escala espacial.

5.2.3 Las concentraciones promedio de una hora deberán contar con un número delimitado de cifras decimales y redondear cuando sea necesario. En el caso del O₃, NO₂ y SO₂, sus concentraciones promedio de una hora en partes por millón se obtendrán con tres cifras decimales, en el caso de las PM₁₀ y PM_{2.5}, sus concentraciones promedio de una hora en µg/m³ se obtendrán sin cifras decimales y en el caso del CO sus concentraciones promedio de una hora en partes por millón se obtendrán con 2 cifras decimales.

5.2.4 El IMECA se adaptará a los límites de protección a la salud que establecen las NOM de los contaminantes criterio O₃, NO₂, SO₂, CO, PM₁₀ y PM_{2.5} (Anexo 3). En el caso del O₃ y el NO₂, el IMECA se obtendrá a

- 5.2.5** partir de concentraciones promedio de una hora; para el SO₂ derivará de una concentración obtenida como promedio móvil de 24 horas; para el CO derivará de una concentración obtenida como promedio móvil de 8 horas. En el caso del O₃ la NOM actual establece un segundo límite permisible definido como promedio móvil de 8 horas; al momento de elaborar la presente norma se consideró pertinente incorporar este límite al cálculo del IMECA, cuando en la ZMVM se cumpla con el límite definido como concentración promedio de una hora. El IMECA para las PM₁₀ y las PM_{2.5} derivará de concentraciones obtenidas como promedio móvil de 24 horas (15, 18, 19, 20, 21).
- 5.2.6** Las concentraciones promedio de una hora para cada uno de los contaminantes criterio, se obtendrán considerando un criterio de suficiencia del 75%, de tal forma que las concentraciones de una hora se calcularán promediando las concentraciones registradas en al menos 45 minutos. Este criterio garantiza la representatividad de los datos (13).
- 5.2.7** Las concentraciones obtenidas como promedios móviles se calcularán a partir de concentraciones promedio de una hora con al menos un 75% de datos horarios válidos. De esta forma el promedio móvil de CO se puede obtener con 8, 7 o 6 horas de información, y los promedios móviles para SO₂, PM₁₀ y PM_{2.5} se pueden obtener con 24 a 18 horas de información previa. Este criterio garantiza la representatividad de los datos (13).
- 5.2.8** El IMECA se reportará regularmente cada hora en todos los días del año, de las 08:00 a las 20:00 horas.
- 5.2.9** El IMECA se reportará en las 5 zonas de calidad del aire de la ZMVM, definidas como Noroeste, Noreste, Centro, Suroeste y Sureste en el Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la ZMVM, 2002-2010 (10).
- 5.2.10** El IMECA de cada zona estará representado por el mayor de los valores del IMECA de cualquier contaminante que sea registrado en cualquiera de las estaciones de monitoreo ubicadas en la zona. El IMECA se identificará por medio de un color y un calificativo de acuerdo con el grado de riesgo que represente para la salud humana.

En la siguiente escala de números y colores, entre el 0 y 50, el color verde, corresponderá a la condición recomendable de calidad del aire para que cualquier persona pueda realizar todo tipo de actividades al aire libre; entre el 51 y el 100, la asignación del color amarillo indicará que las condiciones de calidad del aire con relación a las concentraciones de los contaminantes criterio, aún son adecuadas para que la población realice actividades al aire libre. Conforme se incremente la magnitud de las concentraciones de estos contaminantes se asignará un número mayor y colores que señalan un aumento del riesgo. En orden creciente los colores son naranja, rojo y morado, este último asociado con los eventos de mayor riesgo.

Al momento de elaborar la presente norma el grupo de trabajo mantuvo la discusión acerca del uso de una escala de colores para informar a la población. Se considera que esta situación debe motivar una revisión técnica y fundamentarse en estudios de caso para la Ciudad de México, para lo cual deben impulsarse proyectos con este perfil.

Escala de colores

Verde	Amarillo	Naranja	Rojo	Morado

- 5.2.11** La asignación del número y el color a la concentración del contaminante atmosférico criterio que se encuentre en mayor concentración y que sea registrada en cualquiera de las estaciones de monitoreo, se realiza conforme los siguientes intervalos. Los dos primeros intervalos se definieron a partir de la mitad del valor que tiene el límite que especifica la NOM de cada contaminante (15, 19, 20, 21, 22), de esta forma se intenta prevenir ante los riesgos que causa la exposición continua a concentraciones de contaminantes consideradas como bajas. En los tres intervalos superiores de O₃, NO₂, SO₂ y CO, se consideran los valores actuales que integran sus algoritmos (23). Para las PM₁₀ los intervalos se definieron conforme al valor del límite que señala la NOM (22) y para las PM_{2.5} se considera la forma de cálculo que sigue el Air Quality Index (AQI) de los Estados Unidos de América (23). En ambos tipos de partículas la definición de intervalos contempla que hay una mayor probabilidad de riesgo conforme se incrementa su concentración, esto a pesar de la falta de evidencia acerca de umbrales a partir de los cuales se incrementa el riesgo. De forma general, se puede señalar que en la adopción de estos intervalos se considera que ante la falta de evidencia científica se opta por un sentido precautorio del posible riesgo a los niveles de contaminación atmosférica que se registran en la actualidad en la ZMVM.

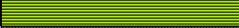
Intervalos de concentración para asignación de colores:

IMECA	O ₃ [ppm] (15)	NO ₂ [ppm] (20)	SO ₂ [ppm] (19)	CO [ppm] (21)	PM ₁₀ [µg/m ³] (22)	PM _{2.5} [µg/m ³] (22, 23)
0 - 50	0.000 - 0.055	0.000 - 0.105	0.000 - 0.065	0.00 - 5.50	0 - 60	0 - 15.4
51 - 100	0.056 - 0.110	0.106 - 0.210	0.066 - 0.130	5.51 - 11.00	61 - 120	15.5 - 40.4
101 - 150	0.111 - 0.165	0.211 - 0.315	0.131 - 0.195	11.01 - 16.50	121 - 220	40.5 - 65.4
151 - 200	0.166 - 0.220	0.316 - 0.420	0.196 - 0.260	16.51 - 22.00	221 - 320	65.5 - 150.4
> 200	>0.220	> 0.420	> 0.260	> 22.00	>320	> 150.4

5.3. COMUNICACIÓN DE RIESGOS

5.3.1. La asignación de un color para el contaminante atmosférico criterio de mayor magnitud y un calificativo comprensible es un mecanismo que facilitará a la población comprender el estado de la calidad del aire de la zona donde reside o realiza sus actividades. Los calificativos de la calidad del aire son: buena, regular, mala, muy mala y extremadamente mala, y se refieren a la importancia del riesgo que implica la concentración de un contaminante atmosférico criterio. El uso del calificativo mala o muy mala, implica que la población debe estar atenta a los niveles de concentración del contaminante atmosférico criterio y su evolución en el tiempo, así como a los mensajes de prevención. En la siguiente tabla se indican los colores de calidad del aire y el calificativo correspondiente.

Calificación asociada al color de la calidad del aire **

Color	Calificativo de la calidad del aire
	Buena
	Regular
	Mala
	Muy Mala
	Extremadamente Mala

** Al momento de elaborar la presente norma el grupo de trabajo mantuvo la discusión acerca del uso de calificativos para informar a la población. Se considera que esta situación debe motivar una revisión técnica y fundamentarse en estudios de caso para la Ciudad de México.

5.3.2. La difusión del IMECA por medio de un color y un calificativo deberá incorporar información sencilla de los riesgos a la salud humana y las acciones de prevención y protección que puede realizar la población. Los mensajes son breves y consideran que si un contaminante atmosférico criterio tiene concentraciones cuyo riesgo es bajo para la salud, no es necesario preocupar a la población; de lo contrario, es necesario señalarle que el contaminante atmosférico criterio puede ocasionar un efecto negativo a la salud, que esté pendiente y atenta a las recomendaciones sobre medidas de protección y que en su caso las adopte.

Mensajes de riesgos a la salud y acciones asociados al color de la calidad del aire

	<i>La calidad del aire es:</i>
 Buena	<i>Adecuada para llevar a cabo actividades al aire libre</i>

Regular	<p><i>Se pueden llevar a cabo actividades al aire libre</i></p> <p><i>Posibles molestias en niños, adultos mayores y personas con enfermedades</i></p>
Mala	<p><i>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</i></p> <p><i>Evite las actividades al aire libre, esté atento a la información de calidad del aire</i></p> <p>“Acuda al médico si presenta síntomas respiratorios o cardíacos”</p>
Muy Mala	<p><i>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</i></p> <p><i>Evite salir de casa y mantenga las ventanas cerradas, esté atento a la información de la calidad del aire</i></p> <p>“Acuda al médico si presenta síntomas respiratorios o cardíacos”</p>
Extremadamente Mala	<p><i>Causante de efectos adversos a la salud de la población en general</i></p> <p><i>Se pueden presentar complicaciones graves en los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma</i></p> <p><i>Proteja su salud, evite salir de casa y mantenga las ventanas cerradas, esté atento a la información de la calidad del aire</i></p> <p>“Acuda al médico si presenta síntomas respiratorios o cardíacos”</p> <p>“No use el automóvil”</p>

- 5.3.2.** La información del IMECA a la población infantil podrá reforzarse mediante el uso de imágenes de “mascotas”, las cuales reflejarán con su estado de ánimo y expresión corporal el impacto en la salud que provoca la contaminación del aire.
- 5.3.3.** La información del IMECA a la población deberá ser ágil y oportuna, de tal forma que le permita adoptar medidas precautorias. Para cumplir con lo anterior deberán emplearse los medios y la tecnología disponible (fax, teléfono, Internet, etc.), adaptando a cada uno los aspectos (color, calificativo, mascota, mensaje de riesgo y acciones sugeridas) mencionados anteriormente.
- 5.3.4.** La información del IMECA (color, calificativo, mensajes de riesgo y acciones sugeridas) con fines preventivos, para notificar con anticipación una posible emergencia ambiental o la calidad del aire del día siguiente, requerirá el uso de herramientas de pronóstico (modelos empíricos, modelos estadísticos, modelos fotoquímicas, entre otros). Esto permitirá informar que la calidad del aire será “amarilla / regular”, “naranja / mala” o “roja / muy mala” con anticipación.

6. BIBLIOGRAFÍA

- (1) SSA. Índice Mexicano de Calidad del Aire (IMEXCA).- Memorándum Técnico AT/02-78. Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente. Secretaría de Salubridad y Asistencia. Talleres Gráficos de la Nación, agosto de 1979.
- (2) Procedimientos de cálculo del IMECA y lineamientos para contar violaciones a las normas, 1994. (Informe técnico interno del GDF-SMA).
- (3) Muñoz, B. 1997. Índices de contaminación atmosférica. Neumología y Cirugía de Tórax, volumen 56, num. 2, abril-junio, 1997. 56 (2):48:58.

- (4) Herrera, A. 1990. Contaminación en Aire, Agua y Suelo en la Ciudad de México, en Medio Ambiente y Desarrollo en México. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Humanidades – UNAM, Vol. 2: 547:572.
- (5) Taller de mejoramiento del IMECA (documento técnico para grupo de trabajo). Secretaría de Medio Ambiente, 2003.
- (6) Ezcurra, E. 1998. De las Chinampas a la Megalópolis. El medio ambiente en la cuenca de México. Colección La Ciencia para Todos, #91; Segunda edición. Fondo de Cultura Económica.
- (7) Lezama, J.L. 2000. Aire dividido, crítica a la política del aire en el Valle de México. El Colegio de México. México.
- (8) Documento base para revisión del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire. Documento técnico de la Secretaría de Medio Ambiente, 2003.
- (9) Revisión del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire. Integración de comentarios y sugerencias del equipo de trabajo. Documento técnico de la Secretaría de Medio Ambiente, 2003.
- (10) Comisión Ambiental Metropolitana., Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la ZMVM 2002 – 2010. México D.F. 2002.
- (11) NOM-035-ECOL-1993. "Métodos de medición para determinar la concentración de Partículas Suspensas Totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición.
- (12) Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. México. 12ª edición.
- (13) Guidance for Using Air Quality-Related Indicators in Reporting Progress in Attaining the State Ambient Air Quality Standards.
- (14) Hayes AE. (2001). Principles and Methods of Toxicology. 4th Edition. Taylor and Frances.
- (15) NOM-020-SSA1-1993. "Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al ozono. Valores normados para la concentración de ozono en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población".
- (16) Organización Panamericana de la Salud (1999). Manual sobre el enfoque de riesgo en la atención materno Infantil.
- (17) *Handbook of Physics*, 2nd. edition, E. U. Condon and H. Odishaw, McGraw Hill Co., Chap. 1 Fundamentals, pags. 1-5 a 1-6 (1967).
- (18) Environmental Protection Agency Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems Volume II: Part 1, Ambient Air Quality Monitoring Program. Quality System Development. August 1998.
- (19) NOM-022-SSA1-1993. "Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de azufre. Valor permisible para la concentración de bióxido de azufre en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población".
- (20) NOM-023-SSA1-1993. "Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno. Valor permisible para la concentración de bióxido de nitrógeno en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población".
- (21) NOM-021-SSA1-1993. "Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono. Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población".
- (22) NOM-025-SSA1-1993. "Salud ambiental. Propuesta de criterios para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas totales, las partículas menores de 10 micrómetros y las partículas menores de 2.5 micrómetros.
- (23) Documento base para revisión del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire. Documento técnico de la Secretaría de Medio Ambiente. 2003.

7. OBSERVANCIA

- 7.1. El IMECA se dará a conocer en el Distrito Federal con base a las 5 zonas de calidad del aire de la ZMVM, definidas como Noroeste, Noreste, Centro, Suroeste y Sureste. Su empleo puede extenderse a los municipios conurbados del Estado de México que comprende la ZMVM (11).
- 7.2. La vigilancia del cumplimiento de esta Norma corresponde a la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal en el ámbito de su competencia.
- 7.3. La Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal podrá verificar los requerimientos indicados en esta Norma en forma periódica cuando lo considere conveniente, debiendo ejecutar en el

corto plazo, las medidas, recomendaciones u observaciones que se deriven de esta verificación, haciendo públicos los resultados y los documentos probatorios.

8. VIGENCIA

- 8.1. La presente Norma entrará en vigor con carácter de obligatorio, al día siguiente de su publicación en la Gaceta Oficial del Distrito Federal.
- 8.2. La presente Norma se revisará cuando se elaboren o modifiquen las Normas Oficiales Mexicanas de Protección a la Salud con carácter federal o local, cuando exista nueva evidencia de riesgo o nuevos resultados de estudios de percepción social relacionados con la temática de contaminación atmosférica.

9. ANEXOS

Anexo 1

FORMA DE MEDICIÓN Y REPORTE DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES CRITERIO EN LA SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE DEL GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL

Contaminante	Norma Oficial Mexicana	Forma de medición y 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	NOM-036-ECOL-1993	
NO ₂	NOM-037-ECOL-1993	
SO ₂	NOM-038-ECOL-1993	
CO	NOM-034-ECOL-1993	

Anexo 2

Representación espacial de las estaciones de monitoreo

Estación	Clave	O ₃	CO	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}
Aragón	ARA		Media	Vecinal			
Atizapán	ATI		Vecinal	Urbana	Urbana		
Azcapotzalco	AZC	Vecinal	Vecinal	Vecinal	Vecinal		
Camarones	CAM						Urbana
Cerro de la estrella	CES		Media	Vecinal		Vecinal	
Coyoacán	COY						Urbana
Cuajimalpa	CUA	Urbana					
ENEP-Acatlán	EAC	Vecinal	Media	Urbana	Vecinal	Vecinal	
Instituto Mexicano del Petróleo	IMP		Vecinal				
Lagunilla	LAG		Media	Vecinal			
La Presa	LPR			Vecinal			
La Villa	LVI			Vecinal		Vecinal	
Los Laureles	LLA			Urbana			
Merced	MER		Media	Vecinal		Vecinal	
Pedregal	PED	Urbana	Vecinal	Urbana	Urbana	Vecinal	
La Perla	PER						Vecinal

Plateros	PLA	Urbana	Media	Urbana	Urbana	Vecinal	
San Agustín	SAG	Vecinal	Vecinal	Vecinal	Vecinal		
San Juan de Aragón	SJA						Vecinal
Santa Úrsula	SUR	Urbana	Vecinal	Urbana	Urbana	Urbana	
Tacuba	TAC	Vecinal	Vecinal	Vecinal	Vecinal		
Tlahuac	TAH					Vecinal	
Taxqueña	TAX			Vecinal			
Tlalnepantla	TLA		Vecinal	Vecinal		Vecinal	Vecinal
Tultitlán	TLI		Vecinal	Urbana	Urbana	Vecinal	
Tlálpán	TPN	Urbana					
UAM-Iztapalapa	UIZ	Vecinal	Media	Vecinal	Vecinal		Vecinal
Vallejo	VAL		Media	Vecinal			
Villa de las Flores	VIF		Vecinal		Urbana	Urbana	
Xalostoc	XAL		Media				

Definición de las escalas de representación espacial.

Tipo	Dimensión de la parcela de aire que caracteriza
Micro	Hasta 100 mts.
Media	Entre 100 y 500 mts.
Vecinal	Entre 500 mts y 4 Km., con uso de suelo homogéneo.
Urbana	Entre 4 y 50 Km.
Regional	Entre algunas decenas a cientos de kilómetros. Se localizan en áreas rurales.
Nacional y global	Caracteriza a un país.

Relación entre el objetivo de monitoreo y la representatividad espacial.

Objetivo de Monitoreo	Escala Espacial
Altas concentraciones	Micro, media, vecinal (en ocasiones urbana***)
Impacto a la Población	Vecinal y urbana
Impacto de fuentes	Micro, media, vecinal
Concentraciones en general y de fondo	vecinal, urbana, regional
Transporte de contaminantes	Urbana y regional
Impacto al bienestar (construcciones y vegetación)	Urbana y regional

***Urbana. Escala aplicable tanto a ciudades como áreas rurales.

Anexo 3

LIMITES PERMISIBLES DE PROTECCIÓN A LA SALUD QUE ESTABLECEN LAS NORMAS OFICIALES MEXICANAS

Contaminante	Norma Oficial Mexicana	Valor del límite permisible	Forma de integración al IMECA
PM ₁₀	NOM-025-SSA1-1993	120 µg/m ³	Promedio móvil de 24 horas. Adaptación para la obtención horaria del IMECA.
PM _{2.5}	NOM-025-SSA1-1993	65 µg/m ³	Promedio móvil de 24 horas. Adaptación para la obtención horaria del IMECA.
O ₃	NOM-020-SSA1-1993	0.11 ppm	Promedio de una hora.

NO ₂	NOM-023-SSA1-1993	0.21 ppm	Promedio de una hora.
SO ₂	NOM-022-SSA1-1993	0.13 ppm	Promedio móvil de 24 horas. Adaptación para la obtención horaria del IMECA.
CO	NOM-021-SSA1-1993	11 ppm	Promedio móvil de 8 horas.

Anexo 4

**ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DEL IMECA (I) DE A PARTIR DE LAS CONCENTRACIONES (C)
DE CADA CONTAMINANTE CRITERIO
OZONO (O₃)**

Intervalo del IMECA	Intervalo de concentraciones [ppm]	Ecuaciones de transformación	Ecuación simplificada
0 - 50	0.000 - 0.055	$I [O_3] = C[O_3] * 50/0.055$	$IO_3 = C[O_3] * 100/0.11$
51 - 100	0.056 - 0.110	$I[O_3] = 50-0.055 * 50/0.055 + C[O_3] * 50/0.055$ $[O_3] = C[O_3] * 50/0.055$	
101 - 150	0.111 - 0.165	$I[O_3] = 100-0.11 * 50/0.055 + C[O_3] * 50/0.055$ $I[O_3] = C[O_3] * 50/0.055$	
151 - 200	0.166 - 0.220	$I[O_3] = 150-0.165 * 50/0.055 + C[O_3] * 50/0.055$ $I[O_3] = C[O_3] * 50/0.055$	
> 200	>0.220	$I [O_3] = C[O_3] * 200/0.22$	

DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO₂)

Intervalo del IMECA	Intervalo de concentraciones [ppm]	Ecuaciones de transformación	Ecuación simplificada
0 - 50	0.000 - 0.105	$I[NO_2] = C [NO_2] * 50/0.105$	$I[NO_2] = C[NO_2] * 100/0.21$
51 - 100	0.106 - 0.210	$I[NO_2] = 50-0.105 * 50/0.105 + C[NO_2] * 50/0.105$ $I[NO_2] = C[NO_2] * 50/0.105$	
101 - 150	0.211 - 0.315	$I[NO_2] = 100-0.21 * 50/0.105 + C[NO_2] * 50/0.105$ $I[NO_2] = C[NO_2] * 50/0.105$	
151 - 200	0.316 - 0.420	$I[NO_2] = 150-0.315 * 50/0.105 + C[NO_2] * 50/0.105$ $I[NO_2] = C[NO_2] * 50/0.105$	
> 200	> 0.420	$I[NO_2] = C[NO_2] * 200/0.42$	

DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂)

Intervalo del IMECA	Intervalo de concentraciones [ppm]	Ecuaciones de transformación	Ecuación de transformación simplificada
0 - 50	0.000 - 0.065	$I[SO_2] = C[SO_2] * 50/0.065$	$I[SO_2] = C[SO_2] * 100/0.13$
51 - 100	0.066 - 0.130	$I[SO_2] = 50-0.065 * 50/0.065 + C[SO_2] * 50/0.065$ $I[SO_2] = C[SO_2] * 50/0.065$	
101 - 150	0.131 - 0.195	$I[SO_2] = 100-0.13 * 50/0.065 + C[SO_2] * 50/0.065$ $I[SO_2] = C[SO_2] * 50/0.065$	
151 - 200	0.196 - 0.260	$I[SO_2] = 150-0.195 * 50/0.065 + C[SO_2] * 50/0.065$ $I[SO_2] = C[SO_2] * 50/0.065$	

> 200	> 0.260	$I[\text{SO}_2] = C[\text{SO}_2] * 200/0.26$	
-----------------	---------	--	--

MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

Intervalo del IMECA	Intervalo de concentraciones [ppm]	Ecuaciones de transformación	Ecuación de transformación simplificada
0 – 50	0.00 – 5.50	$I[\text{CO}] = C[\text{CO}] * 50/5.5$	$I[\text{CO}] = C[\text{CO}] * 100/11$
51 – 100	5.51 - 11.00	$I[\text{CO}] = 50-5.5 * 50/5.5 + C[\text{CO}] * 50/5.5$ $I[\text{CO}] = C[\text{CO}] * 50/5.5$	
101 – 150	11.01 - 16.50	$I[\text{CO}] = 100-11 * 50/5.5 + C[\text{CO}] * 50/5.5$ $I[\text{CO}] = C[\text{CO}] * 50/5.5$	
151 – 200	16.51 – 22.00	$I[\text{CO}] = 150-16.5 * 50/5.5 + C[\text{CO}] * 50/5.5$ $I[\text{CO}] = C[\text{CO}] * 50/5.5$	
> 200	> 22.00	$I[\text{CO}] = C[\text{CO}] * 200/22$	

PARTÍCULAS MENORES A 10 MICROMETROS (PM₁₀)

Intervalo del IMECA	Intervalo de concentraciones [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Ecuaciones de transformación	Ecuaciones de transformación simplificadas
0 – 50	0 – 60	$I[\text{PM}_{10}] = C[\text{PM}_{10}] * 50/60$	$I[\text{PM}_{10}] = C[\text{PM}_{10}] * 5/6$
51 – 100	61 – 120	$I[\text{PM}_{10}] = 50-60 * 50/60 + C[\text{PM}_{10}] * 50/60$ $I[\text{PM}_{10}] = C[\text{PM}_{10}] * 50/60$	
101 – 150	121 – 220	$I[\text{PM}_{10}] = 100-120 * 50/100 + C[\text{PM}_{10}] * 50/100$ $I[\text{PM}_{10}] = 40 + C[\text{PM}_{10}] * 50/100$	$I[\text{PM}_{10}] = 40 + C[\text{PM}_{10}] * 0.5$
151 – 200	221 – 320	$I[\text{PM}_{10}] = 150-220 * 50/100 + C[\text{PM}_{10}] * 50/100$ $I[\text{PM}_{10}] = 40 + C[\text{PM}_{10}] * 50/100$	
> 200	>320	$I[\text{PM}_{10}] = C[\text{PM}_{10}] * 200/320$	$I[\text{PM}_{10}] = C[\text{PM}_{10}] * 5/8$

PARTÍCULAS MENORES A 2.5 MICROMETROS (PM_{2.5})

Intervalo del IMECA	Intervalo de concentraciones [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Ecuaciones de transformación	Ecuaciones de transformación simplificadas
0 – 50	0 – 15.4	$I[\text{PM}_{2.5}] = C[\text{PM}_{2.5}] * 50/15.4$	$I[\text{PM}_{2.5}] = C[\text{PM}_{2.5}] * 50/15.4$
51 – 100	15.5 – 40.4	$I[\text{PM}_{2.5}] = 51-15.5 * 49/24.9 + C[\text{PM}_{2.5}] * 49/24.9$ $I[\text{PM}_{2.5}] = 20.50 + C[\text{PM}_{2.5}] * 49/24.9$	$I[\text{PM}_{2.5}] = 20.50 + C[\text{PM}_{2.5}] * 49/24.9$
101 – 150	40.5 – 65.4	$I[\text{PM}_{2.5}] = 101-40.5 * 19/24.9 + C[\text{PM}_{2.5}] * 49/24.9$ $I[\text{PM}_{2.5}] = 21.30 + C[\text{PM}_{2.5}] * 49/24.9$	$I[\text{PM}_{2.5}] = 21.30 + C[\text{PM}_{2.5}] * 49/24.9$
151 – 200	65.5 – 150.4	$I[\text{PM}_{2.5}] = 151-65.5 * 49/84.9 + C[\text{PM}_{2.5}] * 49/84.9$ $I[\text{PM}_{2.5}] = 113.20 + C[\text{PM}_{2.5}] * 49/84.9$	$I[\text{PM}_{2.5}] = 113.20 + C[\text{PM}_{2.5}] * 49/84.9$
> 200	> 150.4	$I[\text{PM}_{2.5}] = C[\text{PM}_{2.5}] * 201/150.5$	$I[\text{PM}_{2.5}] = C[\text{PM}_{2.5}] * 201/150.5$

Dado en la Ciudad de México, Distrito Federal, a los 17 días del mes de noviembre del año dos mil seis.

EL SECRETARIO DEL MEDIO AMBIENTE

(Firma)

MTRO. EDUARDO VEGA LÓPEZ

Valores recomendados por la OMS para la concentración de contaminantes

Contaminante	Valor recomendado	Fundamento
PM _{2.5}	10 µg/m ³ media anual 25 µg/m ³ media de 24 horas	Como valor guía para el MP2,5 en exposiciones prolongadas se eligió una concentración anual media de 10 µg/m ³ . En el estudio de la Sociedad Americana del Cáncer (ACS) (Pope et al., 2002), este valor representa el extremo inferior de la gama en la que se observaron efectos significativos en la supervivencia.
PM ₁₀	20 µg/m ³ , media anual 50 µg/m ³ , media de 24 horas	Los valores guía para el MP2,5 se convierten a los valores guía correspondientes para el MP10 aplicando una razón MP2,5/MP10 de 0,5. Esta razón de 0,5 es característica de las zonas urbanas de los países en desarrollo y corresponde al límite inferior de la gama encontrada en las zonas urbanas de los países desarrollados.
O ₃	O ₃ : 100 µg/m ³ , media de ocho horas	Estudios de series cronológicas han demostrado que se producen efectos en la salud con concentraciones de ozono por debajo del valor guía anterior (del año 2000) de 120 µg/m ³ , pero no se dispone de pruebas claras de un umbral. Hay una variación individual considerable en la respuesta al ozono, por lo cual la OMS consideró prudente un nuevo valor para el ozono, pasando de 120 µg/m ³ a 100 µg/m ³ (media máxima diaria de ocho horas).
NO ₂	40 µg/m ³ , media anual 200 µg/m ³ , media de una hora	Los estudios experimentales realizados con animales y con personas indican que el NO ₂ , en concentraciones de corta duración superiores a 200 µg/m ³ , es un gas tóxico con efectos importantes en la salud. El valor guía actual de la OMS de 40 µg/m ³ (media anual) se estableció para proteger al público de los efectos del NO ₂ gaseoso en la salud.
SO ₂	20 µg/m ³ , media de 24 horas 500 µg/m ³ , media de 10 minutos	Los estudios controlados realizados con asmáticos que hacían ejercicio indican que algunos de ellos experimentaron cambios en la función pulmonar y los síntomas respiratorios tras periodos de exposición al SO ₂ de apenas 10 minutos. Tomando como base estas pruebas, se recomienda que no se supere una concentración de SO ₂ de 500 µg/m ³ durante periodos con una duración media de 10 minutos.
CO*	100 mg/m ³ (90 ppm) para 15 min 60 mg/m ³ (50 ppm) para 30 min 30 mg/m ³ (25 ppm) para 1 h 10 mg/m ³ (10 ppm) para 8 h.	Se basa en la ecuación exponencial Coburn-Foster-Kane a modo de que las concentraciones de carboxihemoglobina en la sangre no excedan el 2.5%.
Obtenido de "Guías de la Calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005" http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69478/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf?ua=1		
*Obtenido del Capítulo 5.5 sobre el Monóxido de Carbono de la Guía para la Calidad del aire /www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/74732/E71922.pdf		

Glosario

ANN/RNA: Artificial neural network = Red neuronal artificial

AR: (Modelo) Auto regresivo

ARIMA: (Modelo) Auto regresivo de Medias móviles integradas

ARMA: (Modelo) Auto regresivo de Medias móviles

CAME: Comisión Ambiental de la Megalópolis

CO: Monóxido de Carbono

GA/ AG: Genetic algorithm = algoritmo genético

IMECA: Índice Metropolitano de la Calidad del aire

INE: Instituto Nacional de Ecología

INECC: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

MA: (Modelo) Medias móviles

MSE: Mean Squared Error= Error Cuadrático Medio

NOM: Norma Oficial Mexicana

NO₂: Dióxido de Nitrógeno

O₃: Ozono

PM₁₀: Materia particulada con un diámetro menor o igual a 10µm

PM_{2.5} Materia particulada con un diámetro menor o igual a 2.5µm

RAMA: Red automática de Monitoreo Atmosférico

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SIMAT: Sistema de Monitoreo Atmosférico

SO₂: Dióxido de azufre

US EPA: United States Environmental Protection Agency

WHO/OMS: World Health Organization = Organización Mundial de la Salud