

MODELACIÓN Y ESTIMACIÓN DE NO₂ Y O₃ EN ZONAS RURALES Y SUBURBANAS DEL VALLE DE MÉXICO

Modeling and estimation of NO₂ and O₃ in rural and suburban areas of the Valley of Mexico

Ernesto RUIZ-VILLAVICENCIO¹, Miguel Ángel LÓPEZ-LÓPEZ^{1*},
Víctor Manuel CETINA-ALCALÁ¹ y Martha Elva RAMÍREZ-GUZMÁN²

¹ Postgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados, km 36.5 carretera México-Texcoco, Montecillo, 56230 Texcoco, Estado de México, México

² Postgrado en Estadística, Colegio de Postgraduados, km 36.5 carretera México-Texcoco, Montecillo, 56230 Texcoco, Estado de México, México

*Autor para correspondencia: lopezma@colpos.mx

(Recibido: febrero 2019; aceptado: octubre 2019)

Palabras clave: variables meteorológicas, modelos de estimación, regresión lineal múltiple, contaminantes del aire

RESUMEN

Los bosques circundantes del Valle de México son afectados por la contaminación del aire producida en el valle; sin embargo, en el bosque son escasas las estaciones de monitoreo ambiental. Esto dificulta el estudio de los impactos de la contaminación en esa área. El presente estudio pretendió investigar la factibilidad técnica del uso de modelos matemáticos para estimar la presencia de O₃ y NO₂ en puntos rurales y suburbanos del Valle de México. Se desarrollaron modelos de estimación de O₃ y NO₂ en áreas rurales y suburbanas del Valle de México, usando registros de las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) y de variables meteorológicas de la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) del Valle de México. Se elaboraron 12 modelos de regresión lineal múltiple para las estaciones de monitoreo Ajusco Medio, Cuajimalpa, Cuautitlán y Montecillo. Las estimaciones de O₃ están en función de las concentraciones de dicha sustancia, o bien a partir de concentraciones de NO₂, O₃ y variables meteorológicas registradas por la RAMA y la REDMET. Los modelos para NO₂ estiman el contaminante en función de concentraciones de NO₂ y variables meteorológicas. Los mejores modelos de estimación de O₃ son aquellos que dependen de sus concentraciones registradas en otras estaciones, mientras que las variables meteorológicas con mayor impacto sobre el O₃ son temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Los modelos para el NO₂ presentaron buen comportamiento excepto en la estación Cuautitlán. Las variables con mayor impacto sobre el NO₂ son temperatura y dirección de vientos.

Key words: meteorological variables, estimation models, multiple linear regression, air pollutants

ABSTRACT

Forests surrounding the Valley of Mexico are affected by air pollution produced within the valley; however, air pollution monitoring stations are scarce within the forest areas. This condition prevents the impacts of air pollution on forests from being studied.

The aim of this study was to investigate the technical feasibility of using mathematical models to estimate O₃ and NO₂ concentrations in rural and suburban sites around the Valley of Mexico. Models for estimation of O₃ and NO₂ from data collected from the stations of the Red Automática de Monitoreo Atmosférico (automatic air quality monitoring network, RAMA) and climatological variables from the Red de Meteorología y Radiación Solar (meteorology and solar radiation network, REDMET) of the Valley of Mexico were developed. We made 12 lineal multiple regression models for estimating air pollutants for stations Ajusco Medio, Cuajimalpa, Cuautitlán, and Montecillo. Estimations of O₃ are a function of O₃ concentrations and/or concentrations of NO₂, O₃, and meteorological variables from RAMA and REDMET. Models for NO₂ estimate this pollutant as a function of concentrations of NO₂ and meteorological variables. The best models for estimating O₃ are those that depend on O₃ concentrations from other stations, being temperature, relative humidity, and wind velocity the meteorological variables that impacted O₃ estimations the most. Models for NO₂ concentrations behaved correctly, except that of Cuautitlán. Temperature and wind direction are the variables that impacted NO₂ concentrations the most.

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica tiene origen natural pero principalmente se genera por actividades humanas. El ozono (O₃), formado principalmente por la oxidación de dióxido de nitrógeno (NO₂), es parte de los contaminantes potencialmente dañinos en zonas agrícolas (Alvarado-Rosales y Hernández-Tejeda 2002). Ambos tienen efectos dañinos en la salud del ser humano, animales y bosques. El O₃ daña bosques, plantaciones y zonas de cultivo y disminuye la resistencia de las plantas ante sequías o bajas temperaturas (WHO 2006).

En la actualidad, muchas ciudades del mundo cuentan con registros de algunos contaminantes atmosféricos; sin embargo, en los bosques es poco común encontrar instalaciones para el registro de contaminantes. Éste es el caso de los bosques y áreas rurales colindantes con el Valle de México, donde a pesar de la presencia de daños a los bosques documentados (López-López et al. 1998, Hernández-Tejeda et al. 2001, Alvarado-Rosales y Hernández-Tejeda 2002, Bauer y Hernández-Tejeda 2007), se carece de registros que permitan relacionar los daños presentes en los árboles con las concentraciones de contaminantes atmosféricos.

Una opción para conocer las concentraciones de contaminantes del aire en zonas rurales es la elaboración de modelos de predicción a partir de datos de contaminantes y variables meteorológicas procedentes de estaciones cercanas a los sitios rurales.

En el Valle de México, la concentración de O₃ está influenciada por la fisiografía de la región, pero la velocidad de reacción del O₃ y el NO₂ está fuertemente relacionada con vientos, humedad,

temperatura y radiación solar (Alvarado-Rosales y Hernández-Tejeda 2002). Existen pocos estudios sobre modelos predictivos de O₃ en el Valle de México, y aún menos estudios donde se consideran variables meteorológicas para desarrollar los modelos de estimación de las concentraciones de O₃ y NO₂ en localidades rurales como Ajusco Medio (AJM), Cuajimalpa (CUA), Cuautitlán (CUT) y Montecillo (MON).

Algunos estudios han demostrado que los contaminantes atmosféricos presentan correlación con las variables meteorológicas. En una investigación realizada en el Valle de México en las estaciones de monitoreo Merced, Tlalnepantla y Pedregal, Correa et al. (1999) demostraron que el NO₂, precursor del O₃, presenta una correlación moderadamente alta ($r = 0.85$) con este último, según un modelo de regresión múltiple, mientras que los parámetros meteorológicos presentan una relación débil. Además, estos autores propusieron inicialmente una ecuación de regresión lineal múltiple para predecir las concentraciones máximas diarias de O₃ con base en concentraciones de esta sustancia observadas en periodos anteriores, tomando además como variables explicativas algunos parámetros del estado del tiempo y concentraciones de contaminantes precursores del día anterior.

Ramos et al. (2010) emplearon un análisis de regresión múltiple de los datos de las concentraciones de dióxido de azufre (SO₂), NO₂, ácido sulfhídrico (H₂S) y material particulado de 10 μm (PM₁₀) en la zona norte de Chiapas para describir las concentraciones en función del tiempo y/o de las variables meteorológicas temperatura, humedad relativa y dirección de los vientos; concluyeron que las variables meteorológicas describieron adecuadamente la concentración anual

y mensual, pero no la concentración diaria. Además, reportaron que la correlación de NO₂ fue negativa con la humedad relativa y la altura de la capa de mezcla, y positiva con la temperatura, la radiación solar y la velocidad escalar del viento. Esto indica que, de manera significativa (aunque con coeficientes de correlación relativamente bajos), al aumentar la humedad relativa y la altura de la capa de mezcla, disminuyó la concentración de NO₂ y viceversa. Lo contrario ocurrió con la temperatura, radiación solar y velocidad del viento, variables que, al aumentar, indujeron el incremento de las concentraciones de NO₂.

Por otro lado, Novoa et al. (2014) propusieron ecuaciones de regresión lineal múltiple para la estimación de las concentraciones en las estaciones Pedregal, Merced y Tlalnepantla, con base en datos de concentraciones O₃, NO₂, NO_x, SO₂, CO, PM₁₀ y PM_{2.5} como variables independientes registrados por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) de la Ciudad de México y las variables meteorológicas temperatura, humedad relativa, dirección de vientos y velocidad de vientos como variables independientes registrados por la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) del Valle de México. Estos autores encontraron una fuerte correlación entre el O₃ y la temperatura en la estación de monitoreo Tlalnepantla. Por último, mediante el uso de análisis de componentes principales, determinaron que los parámetros meteorológicos como temperatura y humedad relativa tienen un fuerte impacto en la contaminación del aire de la Ciudad de México.

El presente estudio tuvo por objeto evaluar la factibilidad técnica de estimar, mediante modelos matemáticos, las concentraciones de O₃ y NO₂ atmosférico en zonas suburbanas o rurales del Valle de México, a partir de datos de los mismos contaminantes y/o de variables meteorológicas de otros puntos del valle.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se eligieron cuatro sitios de estudio dentro del Valle de México, todos cercanos a zonas rurales y en diferentes puntos cardinales: estación AJM al sur, CUA al oeste, CUT al norte y MON al este del valle. La selección de estos puntos permite determinar si mediante procedimientos estadísticos como los utilizados en el presente estudio, es posible estimar, con una precisión modesta, las concentraciones de O₃ y NO₂ en zonas rurales/suburbanas, de tal forma que sea posible estudiar los impactos de estos contaminantes en los ecosistemas agrícolas y forestales que prevalecen en esos puntos.

Los datos se obtuvieron de los registros de las concentraciones de O₃, NO₂ y variables meteorológicas de las estaciones de monitoreo de la RAMA y de las estaciones meteorológicas de la REDMET, localizadas en Ciudad de México (CDMX) y el Estado de México (EDOMEX). Ambas redes de monitoreo están conformadas por un total de 38 estaciones distribuidas en todo el Valle de México (**Cuadro I**).

Las bases de datos con la información utilizada en este estudio fueron obtenidas de la página oficial de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA 2019). Se descargaron los registros del periodo 2010-2017 de las siguientes variables: O₃, NO₂, temperatura (Tem), humedad relativa (Hr), dirección de vientos (Dv) y velocidad de vientos (Vv).

El registro de contaminantes se ejecuta cada hora, produciendo un total de 24 registros de cada variable por día. Para este estudio se decidió conformar una sola base de datos con valores promedio diarios, obteniéndose un total de 17 520 registros promedio del periodo 2010-2017. La base de datos incluye los registros promedio de las siguientes variables en sus respectivas unidades: O₃ en partes por billón (ppb), NO₂ en ppb, temperatura en grados centígrados (°C), humedad relativa en porcentaje (%), dirección de vientos en grados acimut (°A) (Pérez-Camacho et al. 2013) y velocidad de vientos en metros sobre segundo (m/s).

La base de datos se utilizó fundamentalmente para correlacionar las concentraciones de O₃ en las estaciones rurales/suburbanas con las correspondientes y las de NO₂; asimismo, con variables meteorológicas de otras estaciones de las redes mencionadas. Para ello se utilizó el paquete estadístico SAS 9.4. Las variables que finalmente conformaron los modelos de estimación fueron seleccionadas mediante el procedimiento de pasos sucesivos (stepwise), previo análisis para probar los supuestos de normalidad, linealidad, multicolinealidad y homocedasticidad. Las variables dependientes fueron las concentraciones de O₃ y NO₂ en las estaciones rurales/suburbanas, mientras que las variables O₃, NO₂, temperatura, humedad relativa, velocidad de vientos y dirección de vientos (todas ellas en estaciones principalmente urbanas) fueron consideradas como variables independientes.

El procedimiento de análisis contempló la estimación de concentraciones de O₃ en las estaciones de monitoreo atmosférico AJM, CUA, CUT y MON para el mismo día de registro con base en concentraciones de O₃ registrado en otras estaciones de la RAMA. Asimismo, se estimó el O₃ con base en concentraciones de O₃, NO₂ y variables meteorológicas

CUADRO I. ESTACIONES DE MONITOREO DE LA RED AUTOMÁTICA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO Y RED DE METEOROLOGÍA Y RADIACIÓN SOLAR, CONSIDERADAS EN EL ESTUDIO

Clave	Estación	Delegación o municipio	Estado	Latitud (DD)	Longitud (DD)	Altitud (m)
ACOL**	Acolman	Acolman	EDOMEX	19.635501	-98.912003	2198 m
AJU**	Ajusco	Tlalpan	CDMX	19.154674	19.2721	2953 m
AJM**	Ajusco Medio	Tlalpan	CDMX	19.2721	-99.207658	2619 m
ATIZA**	Atizapán	Atizapán de Zaragoza	EDOMEX	19.576963	-99.254133	2341 m
AZC	Azcapotzalco	Azcapotzalco	CDMX	*	*	2252m
BJU	Benito Juárez	Benito Juárez	CDMX	19.371612	-99.158969	2250 m
CAM	Camarones	Azcapotzalco	CDMX	19.468404	-99.169794	2233 m
CCA	Centro de Ciencias de la Atmósfera	Coyoacán	CDMX	19.3262	-99.1761	2280 m
CHO**	Chalco	Chalco	EDOMEX	19.266948	-98.886088	2253 m
COY	Coyoacán	Coyoacán	CDMX	*	*	2240 m
CUA**	Cuajimalpa	Cuajimalpa de Morelos	CDMX	19.365313	-99.291705	2704 m
CUT**	Cuautitlán	Tepotztlán	EDOMEX	19.722186	-99.198602	2263 m
FAC	Fes Acatlán	Naucalpan de Juárez	EDOMEX	19.482473	-99.243524	2299 m
GAM	Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	CDMX	19.4827	-99.094517	2227 m
HGM	Hospital General de México	Cuauhtémoc	CDMX	19.411617	-99.152207	2234 m
INN**	Investigaciones Nucleares	Ocoyoacac	EDOMEX	19.291968	-99.38052	3082 m
IZT	Iztacalco	Iztacalco	CDMX	19.384413	-99.117641	2238 m
LPR**	La Presa	Tlalnepantla de Baz	EDOMEX	19.534727	-99.11772	2302 m
LLA	Los Laureles	Ecatepec de Morelos	EDOMEX	19.578792	-99.039644	2230 m
MPA**	Milpa alta	Milpa Alta	CDMX	19.17688	-98.990175	2592 m
MER	Merced	Venustiano Carranza	CDMX	19.42461	-99.119594	2245 m
MGH	Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	CDMX	19.40405	-99.202603	2366 m
MON**	Montecillo	Texcoco	EDOMEX	19.460415	-98.902853	2252 m
NEZ	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	EDOMEX	19.393734	-99.028212	2235 m
PED	Pedregal	Álvaro Obregón	CDMX	19.325146	-99.204136	2326 m
SAG	San Agustín	Ecatepec de Morelos	EDOMEX	19.532968	-99.030324	2241 m
SFE	Santa Fe	Cuajimalpa de Morelos	CDMX	19.357357	-99.262865	2599 m
SJA	San Juan de Aragón	Gustavo A. Madero	CDMX	*	*	2450m
SUR	Santa Úrsula	Coyoacán	CDMX	*	*	2250m
TLAH	Tláhuac	Xochimilco	CDMX	19.246459	-99.010564	2297 m
TLA	Tlalnepantla	Tlalnepantla de Baz	EDOMEX	19.529077	-99.204597	2311 m
TLI**	Tultitlán	Tultitlán	EDOMEX	19.602542	-99.177173	2313 m
UIZ	UAM Iztapalapa	Iztapalapa	CDMX	19.360794	-99.07388	2221 m
UAX	UAM Xochimilco	Coyoacán	CDMX	19.304441	-99.103629	2246 m
VIF	Villa de las Flores	Coacalco de Berriozábal	EDOMEX	19.658223	-99.09659	2242 m
XAL	Xalostoc	Ecatepec de Morelos	EDOMEX	19.525995	-99.0824	2160 m

*Estaciones de monitoreo atmosférico con ubicación no especificada, **Estaciones de monitoreo atmosférico ubicadas en áreas rurales/suburbanas. EDOMEX: Estado de México, CDMX: Ciudad de México

registradas por la REDMET, tomando como base datos registrados de 2010 a 2017. Finalmente, para la estimación de NO₂, en los modelos se tomaron en consideración las concentraciones de NO₂ registradas en otras estaciones de la RAMA y se elaboró otro grupo de modelos en los que se consideraron las concentraciones de NO₂ y variables meteorológicas.

Los modelos de estimación se utilizaron en fechas aleatorias de 2010 a 2018 (**Cuadro II**), con el objetivo de validar cada modelo y determinar su confiabilidad. Sin embargo, en algunos casos, ciertas estaciones de monitoreo no presentaron registros.

CUADRO II. FECHAS SELECCIONADAS ALEATORIAMENTE PARA VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE OZONO Y DIÓXIDO DE NITRÓGENO

18 de febrero de 2010	7 de agosto de 2015
19 de marzo de 2011	6 de octubre de 2016
7 de abril de 2012	2 de julio de 2017
10 de mayo de 2013	10 de enero de 2018
17 de junio de 2014	1 de noviembre de 2018

*Se utilizaron fechas aleatorias dentro del periodo 2010-2018

Por lo anterior, se optó por utilizar el promedio de las estaciones que sí presentaron registros para conformar en su totalidad los modelos de estimación. Finalmente, se probó la aleatoriedad de la distribución de los errores (procedimiento Univariate de SAS).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La variación de las estimaciones de O₃ en las estaciones rurales y suburbanas se explica en más del 84 % por las concentraciones de O₃ en otras estaciones de monitoreo atmosférico. Esto permite afirmar que mediante procedimientos de regresión múltiple es posible estimar las concentraciones de O₃ en sitios rurales y suburbanos del Valle de México y conocer el tipo de relación que presentan (**Cuadro III**).

De acuerdo con los modelos obtenidos, el comportamiento del ozono en las estaciones objetivo muestra principalmente una relación directa con las estaciones cercanas a ellas, probablemente debido al patrón del movimiento de los vientos dominantes (Montiel-Palma 2006) y a la condición cerrada de la cuenca del valle, misma que promueve la acumulación de contaminantes en la zona sur del mismo. Ahí se concentra la mayor superficie de zonas de reserva ecológica y rurales, y se encuentran áreas ganaderas y agrícolas que se ven afectadas por la contaminación del aire. En esta zona, la contaminación daña principalmente cultivos de avena, frijol, hortalizas y sorgo, que son sensibles al O₃, con las consecuentes pérdidas económicas

(INECC 2016, CAME-SEMARNAT-INECC 2017) (**Cuadro III**). Este comportamiento coincide con el encontrado por Franco-Islas et al. (2015).

Por el contrario, en la mayoría de las estaciones lejanas a las estaciones objetivo (sin que esto sea una regla estricta) se presentó una correlación inversa, lo cual indica que al aumentar el O₃ en la estación objetivo, éste disminuye en las estaciones lejanas y viceversa. Tal comportamiento se debe probablemente a la influencia de las variables meteorológicas, particularmente la temperatura y los vientos sobre las concentraciones y dispersión de O₃, tal como lo han reportado Jazcilevich et al. (2003), Fernández-Fernández et al. (2011), Ooka et al. (2011), Franco-Islas (2014), Cano et al. (2016) y SEDEMA (2017) (**Cuadro III**).

El **cuadro III** muestra los modelos de estimación de las concentraciones de O₃ en cuatro estaciones rurales/suburbanas, a partir de las concentraciones del mismo contaminante registradas en otras estaciones de la RAMA. Con excepción de la estación AJM, los registros de O₃ son válidos para estimar las concentraciones de O₃ en las estaciones rurales/suburbanas del Valle de México con coeficientes de determinación relativamente elevados ($R^2 > 0.84$).

Asimismo, el **cuadro III**, señala que el ozono participa en los modelos, principalmente mediante correlación directa. En el caso de AJM con las estaciones seleccionadas en el modelo, cuatro presentan correlación directa y tres correlaciones inversas (proporción 4:3). Similarmente, las proporciones de registros de O₃ con efectos directos respecto a los

CUADRO III. MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE O₃ EN LAS ESTACIONES RURALES/SUBURBANAS A PARTIR DE CONCENTRACIONES DE O₃ EN ESTACIONES DE MONITOREO SELECCIONADAS MEDIANTE EL MODELO DE PASOS SUCESIVOS

Estación rural (O ₃)	Modelo de estimación	R ²	RSME
AJM	$0.4630 ([O_3]PED) + 0.1887 ([O_3]AJU) + 0.3304 ([O_3]SFE) - 0.0540 ([O_3]COY) + 0.3120 ([O_3]CHO) - 0.0287 ([O_3]LPR) - 0.0565 ([O_3]TLA)$	0.9139	4.4289
CUA	$0.1565 ([O_3]TLA) - 0.1971 ([O_3]INN) - 0.3048 ([O_3]CHO) + 0.3501 ([O_3]ACOL) + 0.3477 ([O_3]AJM) + 0.127 ([O_3]AJU) + 0.2216 ([O_3]SFE) + 0.1911 ([O_3]MER) + 0.3656 ([O_3]FAC) - 0.222 ([O_3]CUT)$	0.9234	3.8674
CUT	$0.0405 ([O_3]MPA) - 0.2101 ([O_3]CAM) + 0.2424 ([O_3]TLA) + 0.3347 ([O_3]MGH) + 0.3575 ([O_3]TLI) - 0.1136 ([O_3]CCA) - 0.0617 ([O_3]AJM) + 0.0927 ([O_3]MER) + 0.2445 ([O_3]VIF)$	0.8809	3.4784
MON	$0.0767 ([O_3]UAX) - 0.077 ([O_3]BJU) - 0.062 ([O_3]COY) + 0.4410 ([O_3]NEZ) - 0.039 ([O_3]SAG) + 0.1999 ([O_3]CHO) + 0.1043 ([O_3]MER) + 0.2685 ([O_3]ACOL)$	0.8481	3.3585

AJM: Ajusco Medio, CUA: Cuajimalpa, CUT: Cuautitlán, PED: Pedregal, AJU: Ajusco, SFE: Santa Fe, COY: Coyoacán, CHO: Chalco, LPR: La Presa, TLA: Tlalnepantla, ACOL: Acolman, MER: Merced, FAC: FES Acatlán, MPA: Milpa Alta, CAM: Camarones, MGH: Miguel Hidalgo, TLI: Tultitlán, CCA: Centro de Ciencias de la Atmósfera, VIF: Villa de las Flores, UAX: UAM Xochimilco, BJU: Benito Juárez, NEZ: Nezahualcóyotl, SAG: San Agustín, MON: Montecillo, [O₃]: concentración de ozono en ppb

inversos, son 7:3, 6:3 y 5:3 para las estaciones CUA, CUT y MON, respectivamente.

En estos modelos, la variación de las concentraciones de O₃ es explicada en más de 83 % por las concentraciones de O₃ y NO₂, y variables meteorológicas. Los modelos indican que de manera general el O₃ de las estaciones rurales y suburbanas tiene una relación directa con el ozono registrado en estaciones cercanas a ellas (**Cuadro IV**).

El NO₂ tiene, de manera general, una relación inversa con el O₃ cuando se trata de estaciones cercanas; es decir, a menor distancia se reducen las concentraciones de O₃ al aumentar las de NO₂ y viceversa; esto tiene que ver con la conocida evolución del primero a partir del segundo en condiciones de elevada luminosidad (López et al. 1998, Musso et al. 2002, Ballester 2005, SEMARNAT 2018). La Hr también indica un comportamiento inverso respecto a las estaciones objetivo, ya que las condiciones de nubosidad restringen la formación de ozono y viceversa (López et al. 2008, Ooka et al. 2011, Franco-Islas 2014).

La temperatura indica de manera general una relación directa con el O₃, que a su vez está ligada con la nubosidad y la cantidad de radiación en la troposfera, la cual se relaciona con la producción de O₃ a partir del NO₂ (López et al. 1998).

Por su parte, la Dv no tiene un patrón de comportamiento definido en estos modelos, ya que en la misma

proporción presenta correlaciones directas e inversas. Finalmente, la Vv muestra una correlación principalmente directa independientemente de la cercanía o lejanía de las estaciones respecto a las estaciones objetivo.

El **cuadro IV** muestra los modelos de estimación de las concentraciones de O₃ de las estaciones rurales/suburbanas, a partir de las concentraciones del mismo contaminante, de NO₂ y de variables meteorológicas registradas en otras estaciones de la RAMA y la RED-MET. Con excepción de las estaciones AJM y MON, los registros de O₃ en combinación con NO₂ y variables meteorológicas pueden ser utilizados para estimar las concentraciones de O₃ en las estaciones rurales/suburbanas del Valle de México con coeficientes de determinación relativamente elevados ($R^2 > 0.83$).

De igual manera, el **cuadro IV** indica que el NO₂ es una variable que regularmente participa en los modelos, de manera que para el caso de la estación CUT, de nueve variables independientes seleccionadas en el modelo, tres se refieren a NO₂, cuatro a O₃ y dos a variables meteorológicas. Asimismo, las proporciones de registros de O₃ respecto a registros de NO₂, y variables meteorológicas para las restantes estaciones rurales y suburbanas son 2:2:8, 2:2:6 y 2:3:6 para las estaciones AJM, CUA y MON, respectivamente. Las altas proporciones de participación de variables meteorológicas en los modelos significa que los diversos factores meteorológicos influyen consistentemente

CUADRO IV. MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE O₃ EN ESTACIONES RURALES/SUBURBANAS A PARTIR DE CONCENTRACIONES DE O₃, NO₂ Y VARIABLES METEOROLÓGICAS EN ESTACIONES DE MONITOREO SELECCIONADAS MEDIANTE EL MODELO DE PASOS SUCESIVOS

Estación rural (O ₃)	Modelo de estimación	R ²	RSME
AJM	0.2273 ([O ₃]MPA) + 0.78369 ([O ₃]PED) + 0.2302 ([NO ₂]XAL) + (0.0190) ([NO ₂]UAX) - 0.13599 (HrSAG) + 0.1179 (HrMPA) - 1.3063 (TemINN) + 2.1348 (TemNEZ) - 0.0247 (DvAJU) + 0.0171 (DvPED) + 0.6642 (Vv MPA) - 5.9862 (VvBJU)	0.9655	3.1203
CUA	0.0658 ([NO ₂]XAL) - 0.0490 ([NO ₂]ATIZA) + 0.7177 ([O ₃]SFE) + 0.3032 ([O ₃]MGH) + 0.0258 (HrMPA) + 0.1044 (HrBJU) + 0.3921 (TemSAG) + 0.2898 (TemPED) + 0.0096 (DvACOL) + 1.4137 (VvHGM)	0.9750	1.8855
CUT	0.0771 ([O ₃]SFE) + 0.0947 ([O ₃]MER) + 0.2969 ([O ₃]FAC) + 0.2430 ([NO ₂]SJA) + 0.2178 ([O ₃]SJA) - 0.0099 ([NO ₂]SFE) - 0.1972 ([NO ₂]COY) + 1.4225 (VvCUT) + 0.4494 (TemCUA) + 0.0648 ([O ₃]INN)	0.8309	3.7910
MON	0.0225 ([NO ₂]ATIZA) - 0.0106 ([NO ₂]SJA) + 0.3878 ([O ₃]SAG) - 0.0637 ([O ₃]TLA) + 0.5839 ([O ₃]NEZ) + 0.1162 (HrHGM) - 0.1239 (HrMON) + 0.3170 (TemFAC) + 0.8314 (TemNEZ) - 0.8378 (TemPED) + 0.7780 (VvMON)	0.8367	4.2468

ATIZA: Atizapán, MON: Montecillo, CUA: Cuajimalpa, CUT: Cuautitlán, PED: Pedregal, AJU: Ajusco, SFE: Santa Fe, COY: Coyoacán, TLA: Tlalnepantla, ACOL: Acolman, HGM: Hospital General de México, MER: Merced, FAC: FES Acatlán, SJA: San Juan de Aragón, MPA: Milpa Alta, MGH: Miguel Hidalgo, UAX: UAM Xochimilco, BJU: Benito Juárez, NEZ: Nezahualcóyotl, SAG: San Agustín, XAL: Xalostoc, INN: Instituto de Investigaciones Nucleares, AJM: Ajusco Medio, CUA: Cuajimalpa, CUT: Cuautitlán, MON: Montecillo, [O₃]: concentraciones de ozono en ppb, [NO₂]: concentraciones de dióxido de nitrógeno en ppb, Hr: humedad relativa, Tem: temperatura, Dv: dirección de vientos, Vv: velocidad de vientos

en la concentración de O₃ en las regiones rurales/suburbanas del Valle de México. Para la estimación de las concentraciones de NO₂ en las estaciones rurales o suburbanas en estudio, la variación de NO₂ es explicada en más del 84 %, por las concentraciones del NO₂ y variables meteorológicas en otras estaciones, principalmente urbanas (**Cuadro V**).

Los modelos indican una correlación predominantemente directa de NO₂ entre las estaciones objetivo y las estaciones independientes. Es decir, al elevarse las concentraciones de NO₂ en las estaciones rurales, generalmente también lo hacen en las estaciones urbanas. Esta relación probablemente es explicada por tratarse de un gas producido, en el Valle de México, principalmente por la oxidación de combustibles fósiles dentro de los motores de combustión interna (ITF-OECD-CDMX 2017), cuya actividad experimenta un patrón diario con alta intensidad desde las primeras horas del día y menor intensidad durante la noche en todas partes del valle, incluyendo las áreas suburbanas.

La temperatura exhibe de manera general correlación predominantemente inversa con las concentraciones de NO₂ de las estaciones rurales. Esto probablemente se debe a la conocida influencia de la radiación solar (que contiene radiación ultravioleta, acompañada de radiación infrarroja o calor) en la transformación de NO₂ en O₃ (Ramos et al. 2010).

La dirección y velocidad de los vientos también muestran de manera general una relación directa con la concentración de NO₂ cuando se trata de estaciones

cercanas a la estación objetivo, y se presenta una correlación inversa cuando se trata de estaciones lejanas a las estaciones de estudio. Por su parte, la humedad relativa no fue significativa para la estimación del NO₂.

Con excepción de la estación CUT, los registros de NO₂ en combinación con variables meteorológicas pueden ser utilizados para estimar las concentraciones de NO₂ en las estaciones rurales/suburbanas del Valle de México, con coeficientes de determinación relativamente elevados ($R^2 > 0.84$).

Según el **cuadro V**, el dióxido de nitrógeno es una variable que participa de forma recurrente en los modelos, de manera que para el caso de AJM, de nueve variables independientes seleccionadas en el modelo, cinco se refieren al NO₂ y cuatro a variables meteorológicas. Similarmente, las proporciones de registros de NO₂ respecto a registros de tipo meteorológico para las restantes estaciones rurales y suburbanas son 6:3, 2:0 y 8:3 para las estaciones CUA, CUT y MON, respectivamente. El análisis para la validación de los modelos de estimación de la concentración de O₃ en función del O₃ registrado en estaciones principalmente urbanas indica que los modelos CUA, CUT y MON exhibieron baja desviación estándar, mientras que los valores de R^2 fueron elevados y la raíz del cuadrado medio del error (RMSE, por sus siglas en inglés) presentó baja dispersión, por lo cual se concluye que los modelos son adecuados para la estimación de O₃. En cuanto al modelo de la estación AJM, se determinó que

CUADRO V. MODELOS DE ESTIMACIÓN DE NO₂ A PARTIR DE CONCENTRACIONES DE NO₂ Y VARIABLES METEOROLÓGICAS EN ESTACIONES DE MONITOREO SELECCIONADAS MEDIANTE EL MÉTODO DE PASOS SUCESIVOS

Estación rural (NO ₂)	Modelo de estimación	R ²	RSME
AJM	$0.0660 ([NO_2]CCA) + 0.7349 ([NO_2]PED) - 0.2725 ([NO_2]SAG) - 0.0506 ([NO_2]COY) + 0.1015 ([NO_2]UIZ) + 0.6324 (TemUAX) - 0.9332 (TemSAG) - 0.0131 (DvUIZ) - 0.1120 (VvPED)$	0.8437	2.3586
CUA	$1.1539 ([NO_2]SFE) - 0.0398 ([NO_2]TLA) - 0.0858 ([NO_2]CCA) + 0.0861 ([NO_2]MER) + 0.3879 ([NO_2]MON) - 0.1822 ([NO_2]LPR) - 0.4386 (TemMER) + 0.0281 (DvSFE) - 0.0138 (DvMER)$	0.9919	1.5645
CUT	$0.3788 ([NO_2]IZT) + 0.2055 ([NO_2]ATIZA)$	0.2558	8.1898
MON	$-1.0471 ([NO_2]SFE) - 0.2822 ([NO_2]TLA) + 0.0381 ([NO_2]CCA) - 0.2843 ([NO_2]MER) + 0.5642 ([NO_2]LPR) - 0.0121 (TemMER) - 0.0445 (DvSFE) + 0.0078 (DvMER) + 0.1907 ([NO_2]NEZ) + 0.1454 ([NO_2]PED) + 0.9521 ([NO_2]CUA)$	0.9233	2.1745

ATIZA: Atizapán, MON: Montecillo, LPR: La Presa, IZT: Iztacalco, CUA: Cuajimalpa, PED: Pedregal, SFE: Santa Fe, COY: Coyoacán, TLA: Tlalnepantla, MER: Merced, UIZ: UAM Iztapalapa, SAG: San Agustín, CCA: Centro de Ciencias de la Atmósfera, AJM: Ajusco Medio, CUA: Cuajimalpa, CUT: Cuautitlán, MON: Montecillo, [NO₂]: concentración de dióxido de nitrógeno, Hr: humedad relativa, Tem: temperatura, Dv: dirección de vientos, Vv: velocidad de vientos

no es adecuado debido a la presencia de una alta dispersión de los datos, pese a tener un elevado R^2 y una baja RMSE (**Cuadro VI**).

El proceso de validación de los modelos de estimación de O_3 en las estaciones de monitoreo AJM, CUA, CUT, MON con base en concentraciones de O_3 , NO_2 y variables meteorológicas indica que los modelos CUA y CUT obtuvieron baja desviación estándar, valores elevados de R^2 y una baja RMSE, por lo que se concluye que son adecuados para estimar O_3 . En cuanto a los modelos de las estaciones AJM y MON, se determinó que no son adecuados para la estimación de NO_2 , ya que tienen alta dispersión de los datos pese a tener elevado R^2 y baja RMSE (**Cuadro VI**).

Los modelos de estimación de NO_2 de las estaciones de monitoreo AJM, CUA y MON, en función de las concentraciones de NO_2 y variables meteorológicas, obtuvieron baja desviación estándar, elevado R^2 y baja RMSE; se concluyó que son adecuados para estimar NO_2 . En cuanto al modelo de la estación CUT, se determinó que no es adecuado para estimar NO_2 por presentar un bajo valor de R^2 y no incluir variables meteorológicas (**Cuadro VI**).

CONCLUSIONES

Los modelos con mejor precisión para la estimación de las concentraciones de O_3 en las estaciones rurales/suburbanas son los que únicamente incluyen como variables independientes las concentraciones

de O_3 de otras estaciones de la RAMA. Estos resultados podrían establecer aún mejor los daños que ocasiona el O_3 en la vegetación natural, cultivos y ganado en zonas rurales.

Por otra parte, los modelos de las estaciones CUA y CUT que incluyen concentraciones de NO_2 y variables meteorológicas registran buenas estimaciones, demostrando el impacto de las variables independientes mencionadas sobre el comportamiento de O_3 en el Valle de México, destacando la temperatura, humedad relativa y la velocidad de los vientos.

Finalmente, los modelos de estimación de NO_2 muestran en general un buen comportamiento, lo cual indica que las variables meteorológicas tienen un impacto sobre las concentraciones de NO_2 que se presentan en zonas rurales del Valle de México.

En la estimación de la concentración de O_3 o NO_2 en una estación rural, participa principalmente el respectivo contaminante registrado en otras estaciones de monitoreo, pero las variables meteorológicas juegan un papel importante al tener capacidad para modificar las concentraciones de estos u otros contaminantes en un sitio dado.

El uso de la técnica de regresión lineal múltiple para la estimación de concentraciones de O_3 y NO_2 en zonas rurales, a partir de las concentraciones de los mismos contaminantes en otros sitios, es factible; pero la concomitancia de variables meteorológicas, especialmente dirección de viento y temperatura, pueden mejorar la precisión de los modelos.

CUADRO VI. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIONES DE O_3 Y NO_2 DE LAS ESTACIONES RURALES/SUBURBANAS AJUSCO MEDIO (AJM), CUAJIMALPA (CUA), CUAUTITLÁN (CUT) Y MONTECILLO (MON)

Fecha	O_3 AJM ¹	O_3 CUA ^{1*}	O_3 CUT ^{1*}	O_3 MON ^{1*}	O_3 AJM ²	O_3 CUA ^{2*}	O_3 CUT ^{2*}	O_3 MON ²	NO_2 AJM ^{3*}	NO_2 CUA ^{3*}	NO_2 CUT ³	NO_2 MON ^{3*}
18 febrero 2010	-1.3	3.6	4.7	2.1	-2.6	16.2	-3.3	3.2	13.1	-6.6	10.5	11.1
19 marzo 2011	6.0	11.5	3.7	-0.3	-29.3	29.3	-3.5	2.6	15.8	-5.7	17.1	9.9
7 abril 2012	-4.8	-3.4	-1.5	-0.2	-10.1	41.2	-4.6	9.3	11.5	-2.1	4.1	3.9
10 mayo 2013	-19.6	12.5	5.9	31.5	-29.5	68.9	-5.6	-26.0	17.2	-13.3	2.2	7.0
17 junio 2014	-6.6	7.9	7.0	7.0	-10.6	36.6	-10.0	1.1	6.9	-4.2	-4.8	-0.5
7 agosto 2015	9.8517	-2.1917	24.8	2.8	3.7	21.0	-6.6	2.4	2.5	-7.0	5.5	4.0
6 octubre 2016	8.7418	-0.3917	15.8	7.6	-1.2	25.3	-6.7	3.1	4.3	-8.5	0.6	-1.4
2 julio 2017	3.2	-0.4	13.3	4.2	-9.2	20.6	-3.7	-0.8	1.2	-0.7	-0.9	3.6
10 enero 2018	-16.3	0.8	15.3	20.9	-32.4	38.9	-6.9	-12.7	-6.2	-9.8	8.1	3.6
16 noviembre 2018	-8.4	-7.8583	2.1	3.8	-21.0	16.3	4.8	-0.7	3.3	-11.6	9.6	14.1
\bar{X} Residual (ppb)	-2.92	3.79	9.11	7.95	11.91	30.73	-4.60	1.83	6.95	-6.94	5.20	5.54
s Residual (ppb)	±10.13	±5.77	±7.96	±10.27	±12.91	±16.29	±3.88	±10.14	±7.34	±3.99	±6.36	±4.97

*Modelos con adecuada capacidad predictiva de las concentraciones de contaminantes

s: desviación estándar, \bar{X} : media, ppb: partes por billón

¹ O_3 en función de las concentraciones de O_3 ; ² O_3 en función de las concentraciones de O_3 , NO_2 y variables meteorológicas; ³ NO_2 en función de las concentraciones de NO_2 y variables meteorológicas

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo al primer autor, a través de una beca para estudios de Maestría en Ciencias.

REFERENCIAS

- Alvarado-Rosales D. y Hernández-Tejeda T. (2002). Decline of sacred fir in the Desierto de los Leones National Park. En: Urban air pollution and forests: Resources at risk in the Mexico City air basin (Fenn M., Bauer L.I. y Hernández-Tejeda T., Eds.). Springer-Verlag, Nueva York, EUA, pp. 243-260. https://doi.org/10.1007/978-0-387-22520-3_10
- Ballester F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Rev. Esp. Salud Pública*. 79 (2), 159-175.
- Bauer L.I. y Hernández-Tejeda T. (2007). A review of ozone-induced effects on the forests of central Mexico. *Environ. Pollut.* 147 (3), 446-453. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.12.020>.
- CAME-SEMARNAT-INECC (2017). Programa de gestión federal para mejorar la calidad del aire de la megalópolis: PROAIRE de la Megalópolis 2017-2030. Comisión Ambiental de la Megalópolis-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Ciudad de México, México, 314 pp.
- Cano B.Y.N., Morales M.J.A., Sánchez C.L.J., Colina R.M.N. y Torres, P.J.C. (2016). Evaluación de los niveles de ozono en la Ciudad de Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 32 (1), 25-34.
- Correa G.A., Muñoz C.R. y García C.G. (1999). Análisis de ozono y óxidos de nitrógeno mediante técnicas de series de tiempo y regresión lineal. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación, Secretaría del Medio Ambiente, Ciudad de México [en línea]. <https://pdfs.semanticscholar.org/96aa/dc3114a9048c3c82fb4f10769b767fe22d6d.pdf> 08/02/2019.
- Fernández-Fernández M.I., Gallego M.C., García J.A. y Acero F.J. (2011). A study of surface ozone variability over the Iberian Peninsula during the last fifty years. *Atmos. Environ.* 45 (11), 1946-1959. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.01.027>
- Franco-Islas Y. (2014). Distribución espacial e impacto de aeropoluantes en la salud del bosque de conservación del Distrito Federal. Tesis de Doctorado. Postgrado en Ciencias Forestales. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, 87 pp.
- Franco-Islas Y., López-López M.A., Escalona-Maurice M.J., Cetina-Alcalá V.M. y Alvarado-Rosales D. (2015). Análisis espacio-temporal de O₃ y NO₂ en el bosque de conservación del Distrito Federal. En: Avances y perspectivas de geomática con aplicaciones ambientales, agrícolas y urbanas (Fernández Y.M., Escalona M.J. y Valdez J.R., Eds.). Editorial del Colegio de Postgraduados. Texcoco, Estado de México, México, pp. 149-169.
- Hernández-Tejeda T., Cox M.R., Malcolm J., Bauer L.I., Vargas H.J., Velázquez M.A. y Alvarado-Rosales D. (2001). Impacto del ozono sobre el polen de *Pinus hartwegii* Lindl. *Ciencia Forestal en México* 26 (89), 5-18.
- INECC (2016). Diagnóstico sobre la calidad del aire en cuencas atmosféricas de México; informe final: contaminación y salud ambiental. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México, México, 72 pp.
- ITF-OECD-CDMX (2017). Strategies for mitigating air pollution in Mexico City: International Best Practice. International Transport Forum-Organization for the Economic Cooperation and Development-Ciudad de México. Paris, Francia, 108 pp.
- Jazcilevich D.A., García A.R. y Ruiz-Suárez L.G. (2003). A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the central region of Mexico. *Atmos. Environ.* 37 (2), 183-193. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00893-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00893-2)
- López V.E., García P.M.D., Peral P.N., Ballester D.F., Íñiguez F.C. y Pita T.M.L. (2008). Caracterización del ambiente atmosférico en Las Palmas de Gran Canaria y Santa Cruz de Tenerife: 2000-2004. *Rev. Esp. Salud Pública*. 82 (5), 493-507. <https://doi.org/10.1590/S1135-57272008000500005>
- López-López M.A., Velázquez-Mendoza J., Velázquez-Martínez A., González-Romero V. y Cetina-Alcalá V.M. (1998). Estado nutricional de *Abies religiosa* en un área con problemas de contaminación ambiental. *Agrociencia* 32 (1), 53-59.
- Montiel-Palma S. (2006). Análisis de la calidad del aire en el Valle de México a partir del año 1986. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, 85 pp.
- Musso H., Boemo A., Ávila G. y Farfán R. (2002). Concentraciones de ozono y dióxido de nitrógeno en la troposfera de Salta (Capital). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 6 (1), 17-22.
- Novoa B.J., Parra D., Quijano S., Orrego D. y Becerra M. (2014). Análisis de dependencia usando regresión lineal múltiple y regresión de componentes principales en contaminantes del aire y parámetros meteorológicos: caso de estudio. *Revista Quid* (23), 13-20.

- Ooka R., Khiem M., Hayami H., Yoshikado H., Huang H. y Kawamoto Y. (2011). Influence of meteorological conditions on summer ozone levels in the central Kanto area of Japan. *Procedia Environ. Sci.* 4, 138-150. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.03.017>
- Pérez-Camacho M., López-López M.A., Equihua-Martínez A., Cetina-Alcalá V.M. y Méndez-Montiel J.T. (2013). Relationships between site factors and bark beetle attack on pine trees. *J. Biol. Sci.* 13 (7), 621-627. <https://doi.org/10.3923/jbs.2013.621.627>
- Ramos H.S., Bautista M.R. y Valdez M.A. (2010). Estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de Chiapas, México. *Universidad y Ciencia* 26 (1), 65-80.
- SEDEMA (2017). Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2016. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Ciudad de México, México, 34 pp.
- SEDEMA (2019). Mapa de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico y Red de Meteorología y Radiación Solar. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Ciudad de México, México [en línea]. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmM=%27> 10/09/18
- SEMARNAT (2018). Calidad del aire: una práctica de vida. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México, México [en línea]. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/calidad-del-aire-una-practica-de-vida> 5/03/2019
- WHO (2006). WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: Global update 2005; summary of risk assessment. World Health Organization. Ginebra, Suiza, 20 pp.