

ANÁLISIS DEL TRANSPORTE DE OZONO EN LA CUENCA ATMOSFÉRICA DE PUEBLA-TLAXCALA EN EL CENTRO DE MÉXICO

Analysis of ozone transport in the atmospheric basin of Puebla-Tlaxcala in central Mexico

Hugo Alberto BARRERA HUERTAS^{1*}, Ricardo TORRES JARDÓN¹, Luis Gerardo RUÍZ SUÁREZ¹, José Santos GARCÍA YEE¹, Alejandro TORRES JARAMILLO², Ana Patricia MARTÍNEZ BOLÍVAR³, Wilfrido GUTIÉRREZ LÓPEZ¹, León Manuel GARCÍA Y ESPINOSA DE LOS REYES¹, Miguel ROBLES¹, Armando RETAMA HERNANDEZ⁴ y José Agustín GARCÍA REYNOSO¹

¹ Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida Universidad 3000, Universidad Nacional Autónoma de México CU, Ciudad de México C.P. 04510, México

² Departamento de Investigación en Zeolitas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Edificio IC12 Ciudad Universitaria, Puebla-Puebla, C.P. 72570

³ Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Av. Ejército Nacional 223, Col. Anáhuac, Ciudad de México. C.P. 11320, México

⁴ Dirección de Monitoreo Atmosférico, Secretaría del Medio Ambiente, Gran Avenida Colonia Lomas de Chapultepec, Sección I, Delegación Miguel Hidalgo, Ciudad de México, C.P. 11000

*Autor de correspondencia: hbarrera@atmosfera.unam.mx

(Recibido: septiembre 2017, aceptado: noviembre 2018)

Palabras clave: contaminantes atmosféricos, dinámica de ozono, intercambio intercuenas, ozonosondeos

RESUMEN

Se estudió la dinámica del transporte y ocurrencia de ozono en la cuenca atmosférica del valle de Puebla-Tlaxcala (VPT) durante marzo y abril de 2012. Se monitorearon ozono (O_3), óxidos de nitrógeno (NO_x), y variables meteorológicas en superficie en los sitios rurales Huaquechula (HUAQ), Chipilo (CHIP), y Amozoc (AMOZ), y se midió intermitentemente el perfil vertical de O_3 y las condiciones meteorológicas asociadas en CHIP. La norma de calidad del aire mexicana para O_3 de 1 hora de 0.095 ppm, se rebasó en CHIP y AMOZ en cinco y una ocasión respectivamente. Se observó un incremento matutino rápido de O_3 en los tres sitios asociado al mezclado de O_3 por arriba de la capa de inversión conforme se desarrolló la capa de mezcla. Se registraron eventos vespertinos inusuales de O_3 alrededor de 0.080 ppm sostenidos por varias horas en los tres sitios que podrían estar asociados a la recirculación de masas de aire dentro del VPT y el O_3 transportado advectivamente del valle Cuernavaca-Cuautla. El perfil vertical de O_3 mostró un incremento con la altura a concentraciones mayores que las observadas en superficie y el análisis de trayectorias de retroceso en 2-D sugirió condiciones favorables al acarreo de O_3 de la troposfera libre hacia la superficie. Se concluye que el establecimiento de estrategias de control en el VPT debe considerar la influencia del intercambio de O_3 entre cuencas, la estacionalidad meteorológica local y sinóptica, y las posibles contribuciones de O_3 de la troposfera libre y no sólo limitarse a las condiciones locales.

Key words: ozone dynamics, atmospheric pollutants, inter-basin interchange, ozonesounding

ABSTRACT

A study on the dynamic of transport and occurrence of ozone in the air basin of the Puebla-Tlaxcala Valley (PTV) was performed between March and April 2012. The ozone (O_3), nitrogen oxides (NO_x) and several meteorological variables were measured at the surface level in the rural sites of Huaquechula (HUAQ), Chipilo (CHIP), and Amozoc (AMOZ). The vertical O_3 profile and the associated meteorological conditions, were measured intermittently in CHIP. The 1 hour Mexican air quality standard of 0.095 ppm for O_3 , was exceeded in five and one days in CHIP and AMOZ, respectively. A rapid increase in the morning for O_3 levels was observed in the three sites and was associated with the mixing of O_3 above the inversion layer once started the growing of the turbulent mixing layer. Unusual O_3 evening events of around 0.080 ppm were recorded for several hours in the three sites that could be associated with the recirculation of air masses with ozone formed within the VPT and O_3 advectively transported from the Cuernavaca-Cuautla Valley. The vertical O_3 profile showed an increase with height at concentrations even higher than those observed at the surface, and the 2-D analysis of backward trajectories suggested favorable conditions for O_3 transported from the free troposphere to the surface. It is concluded that the implementation of control strategies in the VPT should consider the influence of the inter-basin exchange, the meteorological local and synoptic seasonality, and the possible contributions of O_3 from the free troposphere and not be limited to local conditions.

INTRODUCCIÓN

El ozono (O_3) en la tropósfera baja es un contaminante secundario formado a partir de una compleja serie de reacciones entre los óxidos de nitrógeno ($NO_x = NO + NO_2$) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) en presencia de luz solar y cuyo control no depende linealmente de la reducción indiscriminada de sus precursores (Finlayson-Pitts y Pitts 2000). La importancia de las concentraciones de O_3 registradas viento abajo de zonas urbanas radica en que frecuentemente son mayores a aquellas zonas emisoras de sus precursores, teniendo efectos negativos en la salud de la población y la vegetación en zonas rurales y forestales bajo influencia de la pluma de contaminación urbana (Krupa 1999).

El problema del O_3 ha sido ampliamente documentado para la Cuenca del Valle de México en donde se ha identificado la ocurrencia de un intercambio de masas de aire contaminado entre la cuenca atmosférica donde se asienta la zona urbana de la Ciudad de México y las cuencas atmosféricas vecinas (de Foy et al. 2005, Jazcilevich et al. 2005, Molina et al. 2007, INE 2009, García-Reynoso 2009, Molina et al. 2010, Salcedo et al. 2012). Salcedo et al. (2012) investigaron la dinámica de la contaminación del aire en la cuenca Cuernavaca-Cuautla (CCC) y encuentran que, en ocasiones, es posible el transporte de masas de aire con O_3 entre esta cuenca y la del

valle de Puebla-Tlaxcala (VPT) a través de la micro-región Cuautla-Atlixco. Sin embargo, a pesar de su importancia en la influencia de este transporte en la calidad del aire de Puebla no existe más información sobre esta posibilidad.

Desde la perspectiva del diseño de política ambiental en México, se reconoce una gran complejidad en el control eficaz de la calidad del aire en las diferentes regiones del centro de México debido a la influencia que su compleja orografía tiene sobre los vientos de superficie y su transporte atmosférico entre las diferentes cuencas atmosféricas que lo componen (CAME 2017). Una cuenca atmosférica se define como “un espacio geográfico delimitado parcial o totalmente por elevaciones montañosas u otros atributos naturales con características meteorológicas y climáticas afines, donde la calidad del aire a nivel estacional está influenciada por las fuentes de emisión antropogénicas y naturales en el interior de esta, y por concentraciones de fondo que llegan a la cuenca” (INE 2007).

La importancia de este intercambio entre cuencas alcanza otra dimensión al reconocerse la magnitud de la megalópolis del centro del país. Esta macro-región está conformada por la zonas Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), del valle de Puebla-Tlaxcala (ZMVPT), la zona metropolitana Toluca-Lerma (ZMTL) y las áreas conurbadas de Cuernavaca-Jiutepec, Cuautla y Pachuca (**Fig. 1**),

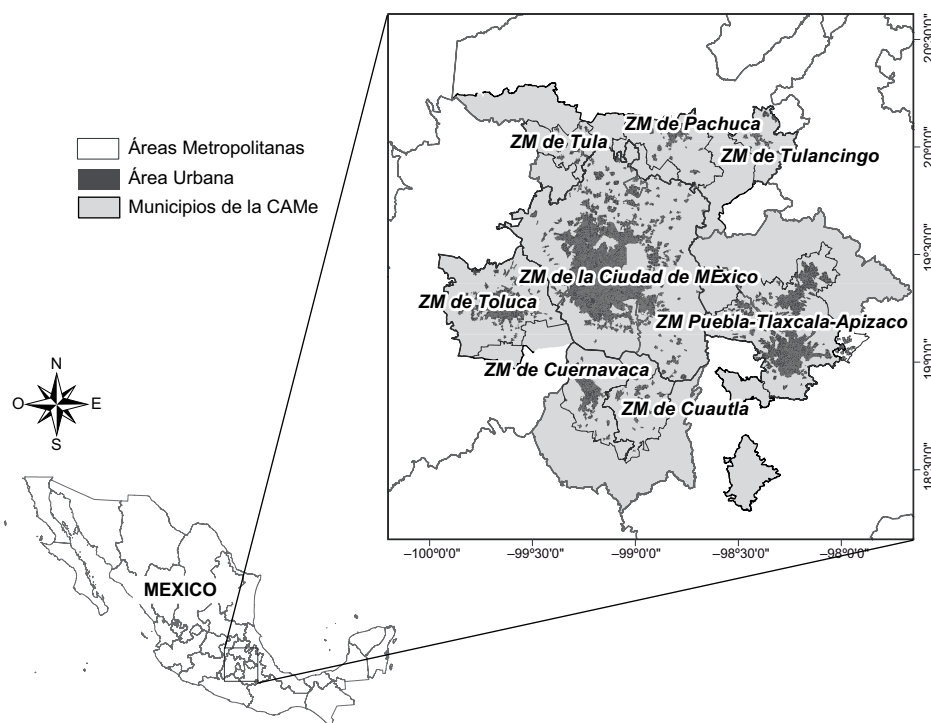


Fig. 1. Ubicación geográfica de la megalópolis del centro de México, estados, ciudades y áreas metropolitanas que la conforman (Modificado del Consejo Estatal de Población, Hidalgo 2001)

con una población aproximada de 27 millones de habitantes (CAME 2017). La región geográfica que cubre esta megalópolis se localiza en el Altiplano Mexicano por arriba de los 1500 msnm, alcanzando elevaciones mayores a los 4500 msnm y es influenciada por sistemas meteorológicos sinópticos tropicales y de latitudes medias.

Sin embargo, salvo la ZMCM que ha sostenido la operación de una red de monitoreo de calidad del aire para su vigilancia, hay todavía muchas deficiencias en las redes de los estados vecinos que han limitado tanto la evaluación de la tendencia en los niveles locales como el entendimiento de la dinámica de transporte del O_3 entre las diversas cuencas y, en consecuencia, su influencia en la calidad del aire local y regional. Como resultado se han generado diferentes programas de mejoramiento de la calidad del aire enfocados al problema aislado a cada zona metropolitana cuyos resultados no indican un control en la problemática.

El objetivo de este trabajo es presentar resultados de un análisis de la dinámica del transporte de O_3 entre las cuencas atmosféricas vecinas y la influencia de otras contribuciones atmosféricas sobre la calidad del aire del VPT.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la zona de estudio

La ZMVPT es la región urbana resultante de la conurbación de varios municipios del centro del estado de Puebla y del sur de Tlaxcala. Se ubica entre los paralelos $18^{\circ} 50'$ y $19^{\circ} 14'$ de latitud norte y los meridianos $98^{\circ} 01'$ y $98^{\circ} 18'$ de longitud oeste, ocupando una superficie de 2392.4 km² y cuenta con una población estimada de 2 728 790 habitantes (INEGI 2010). El VPT se ubica a una altitud aproximada de 2160 msnm; al norte extiende su superficie dentro del estado de Tlaxcala, hacia el oeste y noroeste limitan con la Sierra Nevada formada por los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, que alcanzan altitudes superiores a los 5 000 msnm; al noreste se encuentra con el volcán Malinche con una altitud de 4420 msnm, y por el sur se extiende por el resto de la zona sur de Puebla (Fig. 2). Por su parte, Cuautla se localiza en la zona oriente del estado de Morelos entre los paralelos $18^{\circ} 45'$ y $18^{\circ} 53'$ de latitud norte y los meridianos $98^{\circ} 53'$ y $99^{\circ} 01'$ de longitud oeste y se ubica al sur de la Sierra Chichinautzin y al suroeste de la Sierra Nevada en una planicie de elevación relativamente constante teniendo hacia el sur una cadena de montañas. El

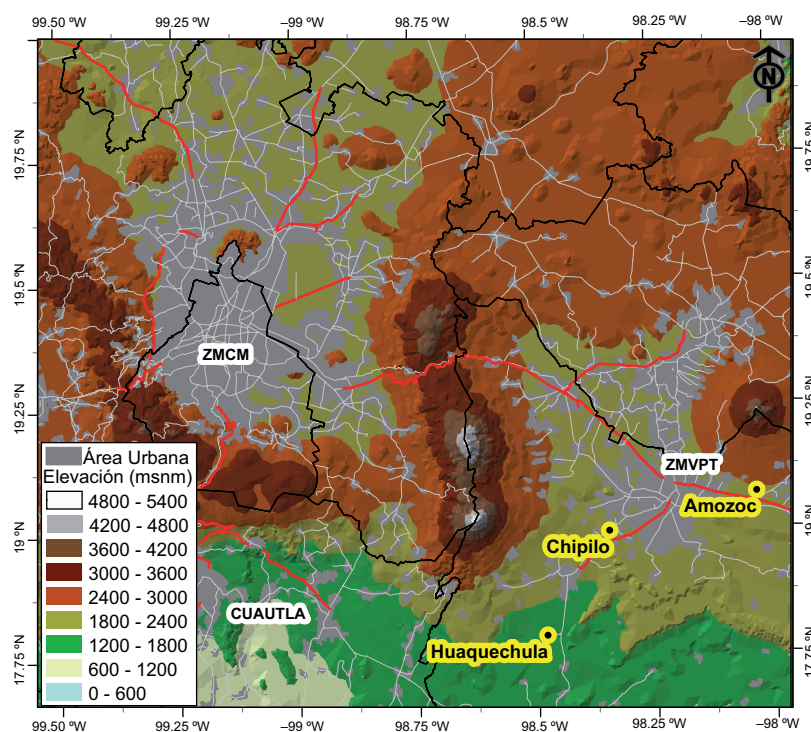


Fig. 2. Localización de los sitios de medición en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla-Tlaxcala. Los contornos negros indican los límites estatales, los contornos rojos denotan vías principales de traslado como autopistas

valle de Cuautla se ubica a una altitud aproximada de 1330 msnm y ocupa una superficie de 153 651 km² con una población estimada de 175 207 habitantes (INEGI 2010). Ambas regiones se comunican a través de un paso de montaña relativamente amplio ubicado al suroeste del VPT.

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, el VPT posee un clima templado (Cw), que conforme se avanza hacia el sur y disminuye su altitud cambia a cálido subhúmedo A(Cw1), que es también el clima que predomina en el valle de Cuautla con lluvias en los meses de junio a octubre. Los patrones de circulación de los vientos en esta región son dominados por la circulación de valle-montaña (Lauer y Klaus 1975). Durante el día, en términos generales hay una circulación norte a sur por la mañana, y hasta mediodía que, conforme avanza el calentamiento del día, va cambiando a una dominancia vespertina de vientos del sur y suroeste promovidos por corrientes que ingresan por el Océano Pacífico. Por la noche se presentan vientos dominantes del sector norte del VPT influenciados por escurrimientos de vientos de la Malinche y de la Sierra Nevada, mientras que en Cuautla influyen escurrimientos del noroeste y noreste de la Sierra Chichinautzin y del Popocatepetl (Jáuregui 1968, Vidal 1980).

Campaña de mediciones

La campaña de mediciones Puebla-Tlaxcala 2012 corresponde a la temporada cálida seca, cuando la radiación solar es intensa e incluye parte de la temporada de O₃ en el centro de México. Se ubicaron tres unidades móviles equipadas con instrumentos para la determinación de calidad del aire y parámetros meteorológicos; una de ellas perteneciente al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) montada en Amozoc (AMOZ) y otras dos pertenecientes al Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (CCA-UNAM) montadas en Chipilo (CHIP) y Huaquechula (HUAQ) (**Fig. 2**). El **cuadro I** describe los instrumentos utilizados en cada uno de los sitios con mediciones en superficie y con el globo cautivo instrumentado. Las mediciones del perfil vertical de O₃ y de las variables meteorológicas se efectuaron acoplando una ozonosonda con instrumentación meteorológica a un globo cautivo sólo en el sitio CHIP. La medición del perfil de O₃ se realizó con una ozonosonda conformada por una celda electroquímica (redox iodo-iodo) en las fechas y horas que se muestran en el **cuadro II**. Se programaron tres sondeos al día (09:00 h, 12:00 h y 18:00 h) con la intención de conocer la evolución de la capa de mezcla diurna y su relación con las

CUADRO I. EQUIPAMIENTO DE LAS UNIDADES DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DURANTE LA CAMPAÑA DE MUESTREO (30 MARZO AL 27 ABRIL DEL 2012)

Parámetro	Principio	Tecnología/ Modelo	Precisión	Límite detectable
O ₃	Fotometría de absorción ultravioleta	Advanced Pollution Instruments 400 Modelo 1006	0.5 ppb	0.4 ppb
		Thermo Environmental Instruments Modelo 49C	1.0 ppb	1.0 ppb
		Integrated Air-pointer multi-gas measurement platform (Recordum Messtechnik GmbH)	1.0 ppb	20 ppb
NO, NO ₂	Quimioluminiscencia. Convertidor interno de Molibdeno	Thermo Environmental Instruments Modelo 42C	±0.4 ppb	0.40 ppb
		Integrated Air-pointer multi-gas measurement platform (Recordum Messtechnik GmbH)	1.0 ppb	Dinámico hasta 20 ppm
Temperatura	Resistencia de platino	Vaisala. Modelo HMP45A	±0.2°C (20°C)	-32.9°-+60°C
		Vaisala. WXT520 AAB0BC10B0	±0.3°C (20°C)	-52°-+60°C
		Met One. Modelo 062	±0.1°C	-50°-+50°C
Humedad relativa	Sensor capacitivo	Vaisala. Modelo HMP45A	±1%RH	0.8-100%Humedad relativa
		Vaisala. WXT520 AAB0BC10B0	±3%HR (0-90%HR) ±5%HR (90-100%HR)	0-100% Humedad relativa
		Met One. Modelo 083E	±2.0% (0-100%HR)	0-100%Humedad relativa
Intensidad del viento	Anemómetro (copas)	Climatronics. Modelo F460 (P/N 100075)	±0.15-±1.0 m/s	0-65 m/s
		Met One. Modelo 010C	0.07 m/s	0-22 m/s
	Sensor ultrasónico	Vaisala. WXT520 AAB0BC10B0	±0.3 % (10 m/s)	0-60 m/s
Dirección del viento	Veleta plana	Climatronics. Modelo F460 (P/N 100076)	±2.0°	0°-360°
		Met One. Modelo 020C	±3.0°	0°-257° (eléctrico) 0°-360° (mecánico)
	Sensor ultrasónico	Vaisala. WXT520 AAB0BC10B0	±3.0°	0°-360°
Radiación solar total	Radiómetro (con filtro)	Li-Cor		
Presión atmosférica	Sensor capacitivo	Vaisala. Modelo PTB101B	±0.5 mb (20°C)	600-1060 mb

concentraciones de contaminantes en superficie. Sin embargo, por cuestiones de seguridad, el lanzamiento de las 18:00 h fue suspendido en varios días, ya que la velocidad del viento cerca de la superficie excedió los 10 m/s, lo cual representa un riesgo tanto para la instrumentación anclada al globo, como de ruptura del cable de sujeción del globo.

Trayectorias de retroceso y avance y condiciones sinópticas

Con el fin de aproximar las rutas que siguieron las masas de aire a diferentes niveles durante eventos de O₃, se construyeron trayectorias de retroceso o retrotrayectorias (backward trajectories) y de avance (forward trajectories) utilizando el modelo Hybrid

CUADRO II. CALENDARIO DE LANZAMIENTOS DE OZONOSONDEOS EN CHIP DURANTE LA CAMPAÑA DE MUESTREO

OZONOSONDEOS EN CHIP					
Fecha	Hora de lanzamiento	Observaciones (altura máxima)	Fecha	Hora de lanzamiento	Observaciones
27-mar-2018	08:00 h	950 m	07-abr-2018	09:00 h	100 m
	12:00 h	900 m		13:00 h	100 m
				18:00 h	25 m
28-mar-2018	08:00 h	960 m	09-abr-2018	09:00 h	60 m
	12:00 h	100 m		13:00 h	80 m
29-mar-2018	08:00 h	75 m	10-abr-2018	09:00 h	100 m
				13:00 h	50 m
				18:00 h	--
30-mar-2018	08:00 h	75 m	11-abr-2018	09:00 h	100 m
	12:00 h	75 m		13:00 h	98 m
	18:00 h	80 m			
31-mar-2018	08:00 h	40 m	12-abr-2018	09:00 h	25 m
	12:00 h	80 m		13:00 h	75 m
				18:00 h	50 m
01-abr-2018	08:00 h	75 m	13-abr-2018	09:00 h	50 m
				13:00 h	80 m
02-abr-2018	09:00 h	80 m	16-abr-2018	09:00 h	60 m
				13:00 h	100 m
				18:00 h	75 m
03-abr-2018	09:00 h	75 m	17-abr-2018	09:00 h	100 m
04-abr-2018	09:00 h	80 m	18-abr-2018	09:00 h	80 m
	13:00 h			13:00 h	50 m
				18:00 h	50 m
05-abr-2018	09:00 h	60 m	19-abr-2018	09:00 h	75 m
	13:00 h	60 m		13:00 h	100 m
	18:00 h	--			
06-abr-2018	09:00 h	97 m			
	12:00 h	40 m			

Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (Stein et al. 2015, Rolph et al. 2017). El modelo reproduce la posición (longitud y latitud) y elevación de la parcela antes de llegar (retroceso) o después de partir (avance) de posiciones geográficas de interés, en este caso de los sitios HUAQ, CHIP y AMOZ. La exactitud y limitaciones de los cálculos de las trayectorias están determinadas por la resolución espacial y temporal de las observaciones meteorológicas, por el modelo de campos de vientos utilizado para la interpolación y por las suposiciones de simplificación del modelo de trayectoria. Los datos de los campos meteorológicos para correr el modelo fueron seleccionados de archivos

de datos “Reanalysis” generados por el Global National Weather Service’s National Centers for Environmental Prediction (NCEP) para las fechas de los eventos. Las trayectorias se obtuvieron en forma interactiva con la versión en línea del HYSPLIT en el sitio del Air Resources Laboratory de la NOAA. Se seleccionaron 12 h de retroceso y 12 h de avance para dos niveles de altura de paso de estas trayectorias sobre los sitios en la superficie de 100 m y 500 m. Asimismo, se utilizó el modelo vertical de velocidad en modo “Archived Surface Analysis” generado por el Weather Prediction Center y disponible al público a través de la NOAA para identificar el tipo de condición sinóptica sobre el centro de México en eventos seleccionados.

RESULTADOS

Meteorología sinóptica

Durante la campaña de mediciones se presentaron variaciones en las condiciones sinópticas alternando entre sistemas de baja y alta presión sobre la parte central del país. La **figura 3** muestra ejemplos de los sistemas sinópticos típicos sobre Norteamérica para los días 17, 19 y 21 con sistemas de tipo transición el primer día y de alta presión los otros.

Meteorología en superficie

La **figura 4** muestra las rosas de viento en superficie para los sitios de CHIP, HUAQ y AMOZ en periodos de 6 h para toda la campaña. Los vientos de superficie observados en cada sitio reflejaron el efecto de la combinación de vientos regionales de tipo valle-montaña y su interacción con los vientos de altura, tal y como previamente lo describen Lauer y Klaus (1975). Durante la madrugada y hasta antes del amanecer, se observaron flujos predominantes provenientes del norte y noreste en todos los casos, influenciados por vientos de escurrimiento de la Malinche y de la Sierra Nevada. Durante la mañana y antes del mediodía, ocurre un cambio en la dirección de los vientos como resultado de las diferencias térmicas en el valle y las laderas en torno al VPT en HUAQ y AMOZ. En HUAQ no se observó este patrón de cambio, manteniéndose flujos del NE en la noche, ocurriendo el escurrimiento de masas de aire hacia la parte más baja y caliente de la región.

No obstante, del mediodía al atardecer, ocurre un cambio completo en la dirección del viento en superficie, ahora hacia el NE en los tres sitios. Este cambio en la dirección parece tener el mismo origen que el patrón observado en la parte occidental de la Sierra Nevada, en donde de forma similar se presentan flujos de retorno vespertinos del valle Cuernavaca-Cuautla (VCC) al valle de México por la influencia de un gradiente de presión inducido térmicamente entre el VPT y el VCC que domina el equilibrio de momentum en la advección de las masas de aire entre Cuautla e Izúcar de Matamoros (Fast y Zhong 1998). Al anochecer y hasta la media noche los vientos del sur-suroeste (S-SO) se debilitan hasta restablecer el flujo de vientos catabáticos del norte-noreste (N-NE).

Mediciones en la vertical

La **figura 5** muestra ejemplos de perfiles verticales de O_3 , temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad de viento observados con el globo cautivo

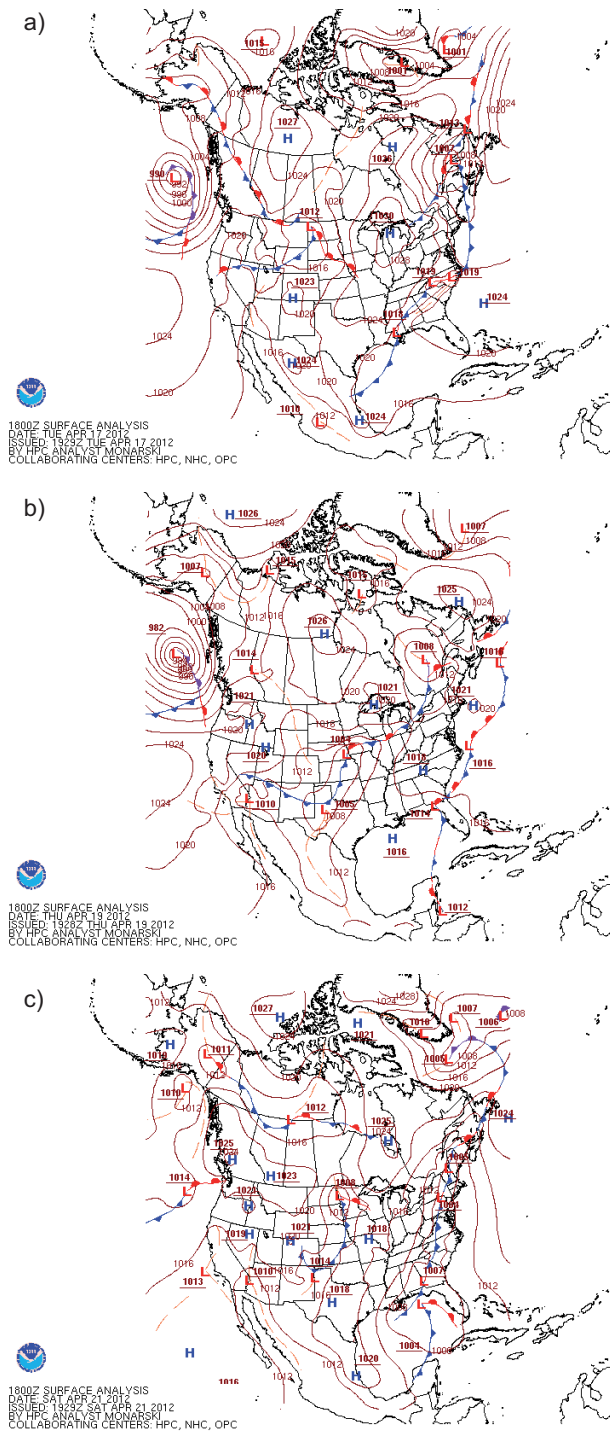


Fig. 3. Condiciones sinópticas en superficie a las 12:00 h (hora local) para, a) 17; b) 19 y c) 21 de abril. Análisis de superficie tomado de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA 2014)

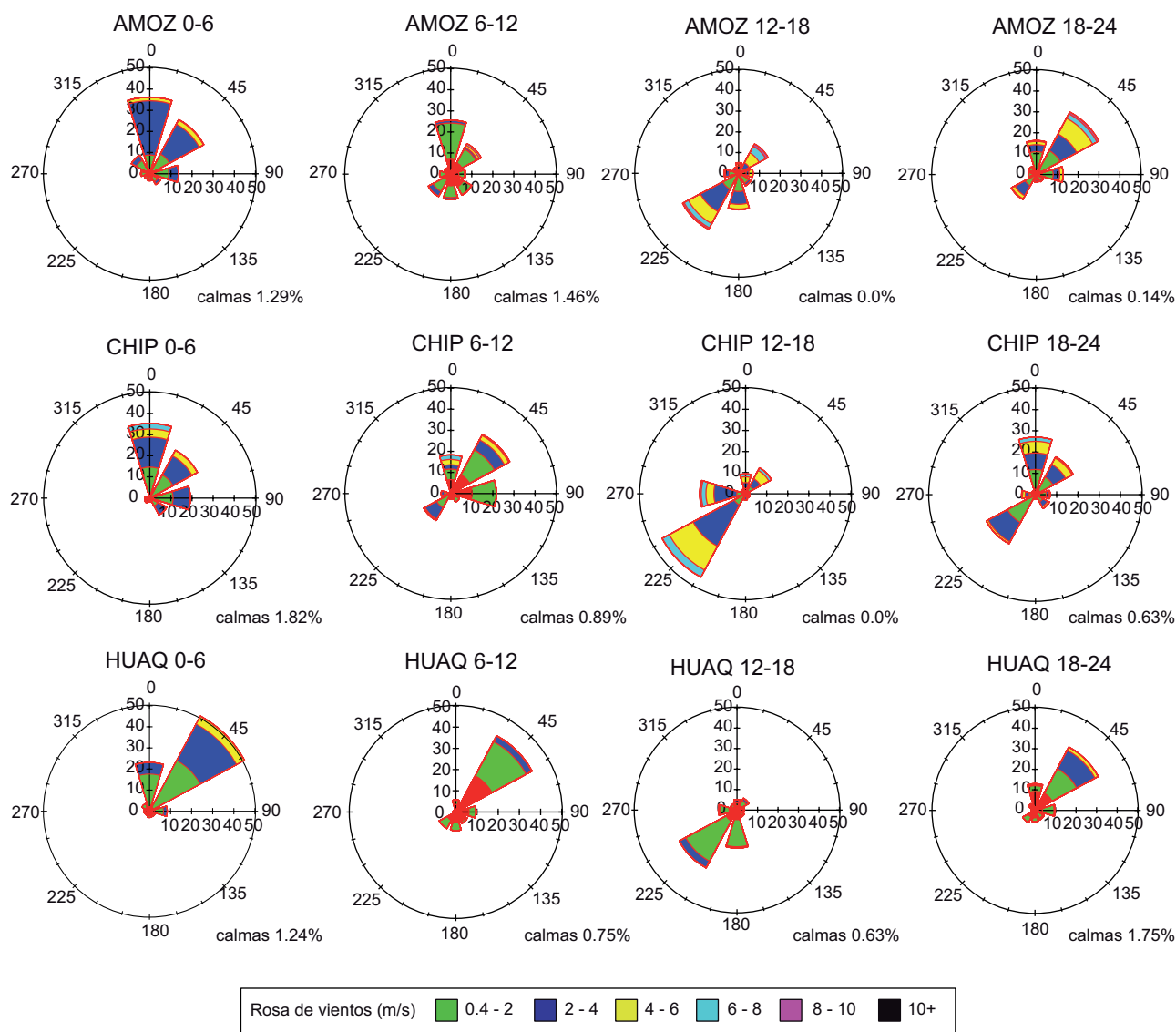


Fig. 4. Rosas de vientos para Amozoc (AMOZ), Chipilo (CHIP) y Huaquechula (HUAQ) construidas con una resolución temporal de 5 min del 30 de marzo al 27 de abril de 2012

instrumentado para un día típico con influencia de un sistema sinóptico de transición (17 de abril) y otro de alta presión (19 de abril).

Bajo influencia del sistema sinóptico de transición hacia alta presión, el perfil de viento muestra una clara dominancia del NE y del E en prácticamente todo el perfil vertical medido con flujos provenientes del E-NE (Golfo de México). El perfil de temperatura muestra un patrón muy estable con dos capas de inversión, una por arriba de los 300 m y otra a 850 m sobre la superficie. El perfil de O_3 presenta un incremento inicial de ~ 0.040 ppm a ~ 0.050 ppm para mantenerse relativamente constante, hasta que

al llegar a los 300 m aumenta súbitamente hasta las 0.060 ppm y se mantiene en ese régimen hasta por arriba de los 1000 m sobre la superficie.

Por otro lado, bajo la influencia de alta presión el viento en la superficie proviene del NE para cambiar rápidamente a vientos del S-SO en torno a los 300 m y paulatinamente a vientos del O y NO conforme se incrementa la altura. El perfil de temperatura muestra condiciones parcialmente inestables con la presencia de una capa estable entre los 300 y 400 m aproximadamente.

El perfil de O_3 se mantuvo estable en torno a las 0.020 ppm en los primeros 200 m para posteriormente

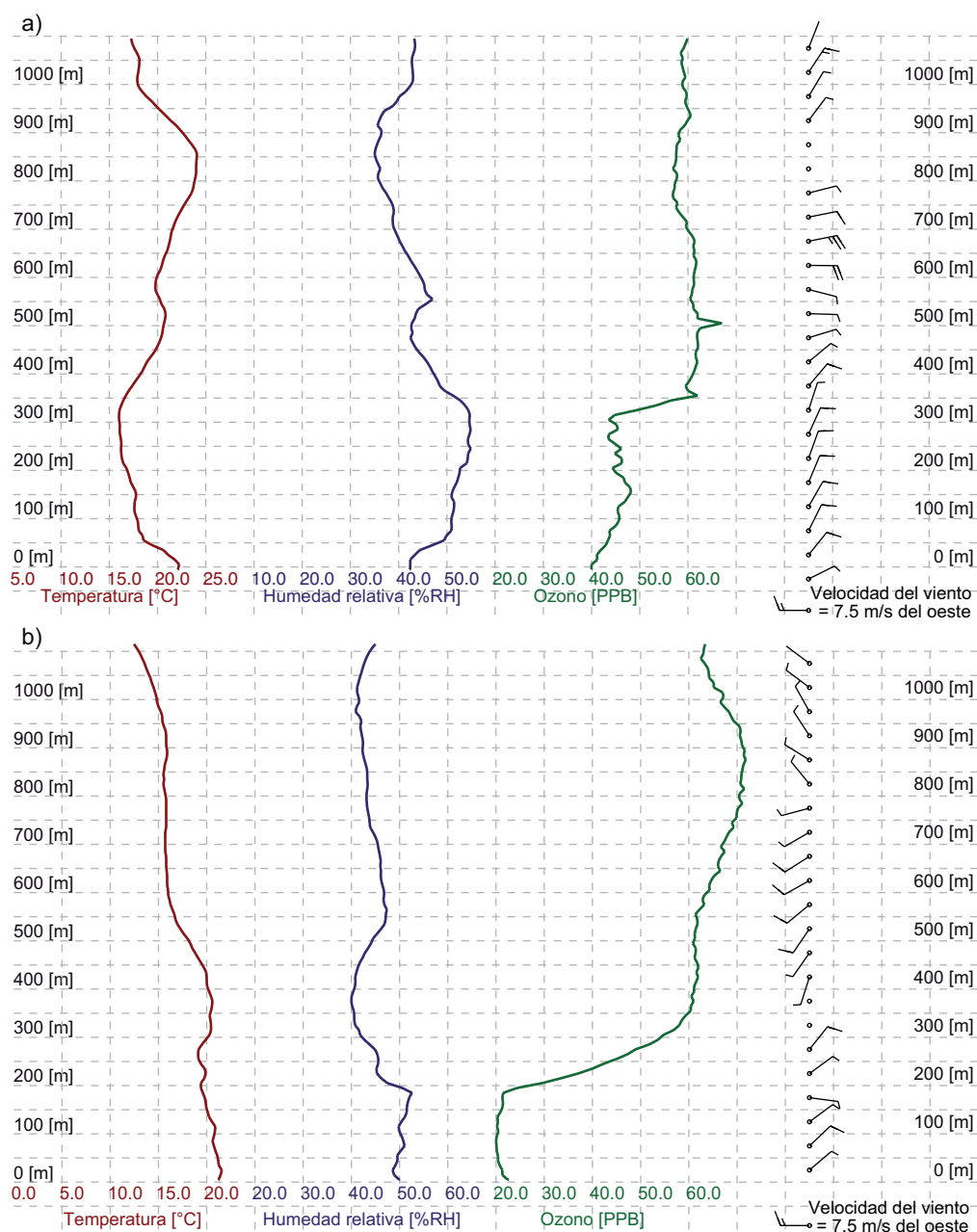


Fig. 5. Perfiles verticales de temperatura, humedad relativa, ozono y dirección e intensidad del viento del: (a) 17 y (b) 19 de abril de 2012, ambos para lanzamientos del globo cautivo a las 09:00 h en CHIP

incrementarse rápidamente hasta alcanzar las 0.060 ppm antes de los 400 m en coincidencia con el cambio en la dirección del viento asociado con el flujo proveniente del suroeste (SO) de México (Océano Pacífico), llegando a alcanzar hasta poco más 0.080 ppm en torno a los 800 m sobre la superficie.

Los perfiles analizados indican que cuando el viento sopla del Golfo de México (E-NE), el O_3 en

la altura es menor que cuando el viento proviene del Pacífico (SO), lo que sugiere que hay un potencial de contribución importante de O_3 en esta región del Altiplano Mexicano, posiblemente de la tropósfera libre, que puede ser incorporado a la superficie al desarrollarse la capa de mezcla, en forma similar a lo reportado por Thompson et al. (2008) durante la campaña MILAGRO.

Mediciones de O₃ en superficie

Las concentraciones promedio horario de O₃ en superficie en AMOZ, CHIP y HUAQ del 30 de marzo al 27 de abril de 2012 se presentan en la **figura 6**. Los periodos sin datos en esta figura se deben a problemas de suministro de energía eléctrica.

En general, se observó una gran correspondencia entre las mediciones de O₃ en todos los sitios con pequeñas diferencias en su magnitud (**Fig. 6**), lo que implica que los tres sitios pudieron haber registrado el paso de las mismas masas de aire, y que las variaciones diurnas estuvieron influenciadas por las condiciones meteorológicas de la región y por el mismo sistema sinóptico.

Se observaron dos episodios que sumaron un total de 5 h de excedencia a las 0.095 ppm en CHIP (SSA, 2014), y un episodio de 1 h en AMOZ. Asimismo, se encontró que conforme transcurrió el mes de abril, los niveles de O₃ fueron cada vez mayores de acuerdo con lo esperado durante la temporada de O₃ en el centro de México, con días con mayor temperatura e insolación (Molina et al. 2010). Las rosas de contaminación (**Fig. 7**) para concentraciones promedio de 5 min en los tres sitios durante la campaña muestran que las mayores concentraciones de O₃ ocurrieron en el periodo comprendido entre las 12:00 y las 18:00 h cuando el viento provino del S-SO con niveles incluso por arriba de las 0.080 ppm. En el periodo de 18:00 a 24:00 h todavía se registraron niveles mayores a 0.060 ppm.

En AMOZ y HUAQ estos niveles están asociados a vientos de retorno del NE, mientras que en CHIP hay una persistencia de vientos después del atardecer del SO y de retorno provenientes del sector N-NE una vez entrada la noche. En general, las parcelas de aire todavía contenían O₃ remanente que previamente

había pasado a través del valle hacia el N-NE. En el último caso, las parcelas de aire de retorno en CHIP contienen una menor cantidad de O₃ debido a que durante su paso por la ciudad de Puebla ocurre una remoción mayor de este contaminante por titulación con emisiones frescas urbanas de NO. En el periodo de las 00:00 a 06:00 h dominaron en general concentraciones de O₃ menores a las medidas antes de las 24:00 h pero ligeramente mayores a las 0.040 ppm. Finalmente, entre las 06:00 h y hasta las 12:00 h persiste la influencia de vientos del norte y noreste acarreado parcelas de aire con niveles relativamente bajos de O₃, pero con evidencia de contribuciones tanto locales como regionales, en particular CHIP y HUAQ.

Trayectorias de parcelas de aire

En la **figura 8** se muestra el resultado de simulaciones de trayectorias de retroceso (TR) y avance (TA) de parcelas de aire realizadas con HYSPLIT para los niveles de arriba a los sitios de estudio de 100 m y 500 m a las 13 h (hora local). La influencia del sistema sinóptico de transición hacia alta presión se observa en la dinámica de los flujos de viento de ese día. Las trayectorias de retroceso (TR) de las parcelas de aire que llegan a la zona de estudio a los dos niveles provienen del NE del VPT, y cuatro de ellas se ubicaban 12 h antes por arriba de los 500 m sobre la superficie según se muestra en la parte inferior de las tres trayectorias del lado izquierdo. Sin embargo, mientras que las parcelas de aire que pasan a los 100 m siguen su trayectoria de avance (TA) hacia el SO elevándose para bordear la Sierra Nevada, las que pasaron sobre los sitios en el nivel de los 500 m giran en el sentido de las manecillas del reloj para retornar hacia el NE elevándose

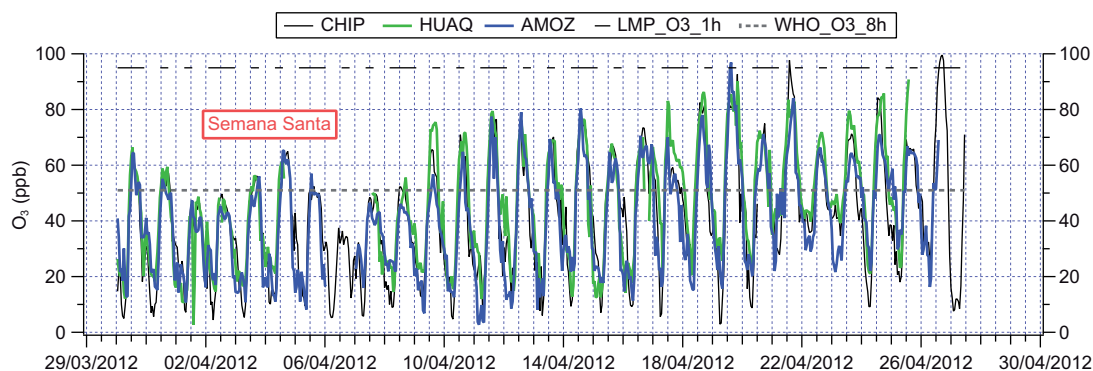


Fig. 6. Serie de tiempo para O₃ en AMOZ, CHIP y HUAQ en superficie durante la campaña de mediciones del 30 de marzo al 27 de abril de 2012. El recuadro naranja discontinuo denota el periodo correspondiente a Semana Santa, y la línea negra discontinua representa el límite máximo permisible de concentración promedio horario (0.095 ppm) en México (NOM-020- SSA1-2014)

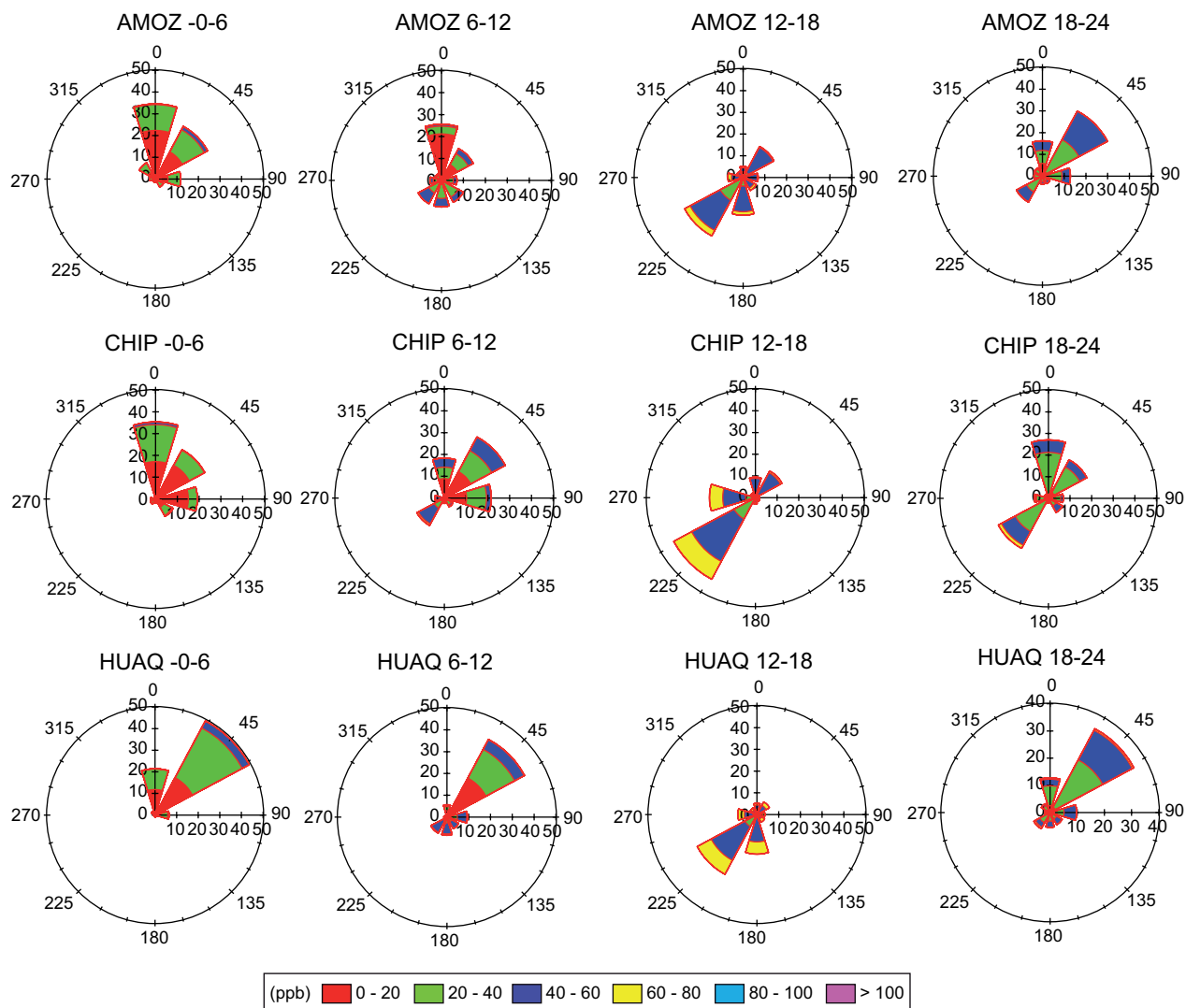


Fig. 7. Rosas de O₃ para AMOZ, CHIP y HUAQ, divididas en tres grupos con intervalos de 00:00-06:00 h, 06:00-18:00 h y 18:00-24:00 h para toda la campaña de medición

para cruzar la Sierra Madre Oriental por arriba de los 5000 m (trayectorias del lado derecho **Fig. 8**). El aporte de O₃ vespertino a los sitios de estudio HUAQ y CHIP fue posiblemente de la misma zona urbana de Puebla, mientras que para AMOZ, que aparentemente no recibió recirculación del VPT, de la conurbación de la ciudad de Tlaxcala al N-NE de la Malinche. Asimismo, los tres sitios pudieron recibir contribuciones de O₃ de la tropósfera libre mediante acarreo de las parcelas de aire que inicialmente estaban por arriba de los 1000 m (3100 msnm), hacia capas más bajas, y que unas horas antes del mediodía se ubicaban por abajo de los 400 m antes de pasar los sitios de estudio, tal y como se observa en el perfil vertical de las TR.

El día 19 de abril y ya bajo la influencia del sistema sinóptico de alta presión, las TR muestran claramente una recirculación lenta de masas de aire ubicadas al sur del VPT hacia la zona urbana de Puebla, a niveles que inician incluso por debajo de los 500 m de altura. Los niveles de O₃ que se observaron en los tres sitios a partir de mediodía pudieron ser concentraciones recirculadas dentro de masas de aire envejecidas del día anterior que permanecieron dentro del VPT. El sitio AMOZ recibe el mayor impacto de esta recirculación de acuerdo con la TR correspondiente por su cercanía con la ciudad. Los niveles de O₃ observados en los tres sitios al atardecer son contribuciones tanto de este O₃ recirculado con el provenientes del VCC. Horas más tarde, estas

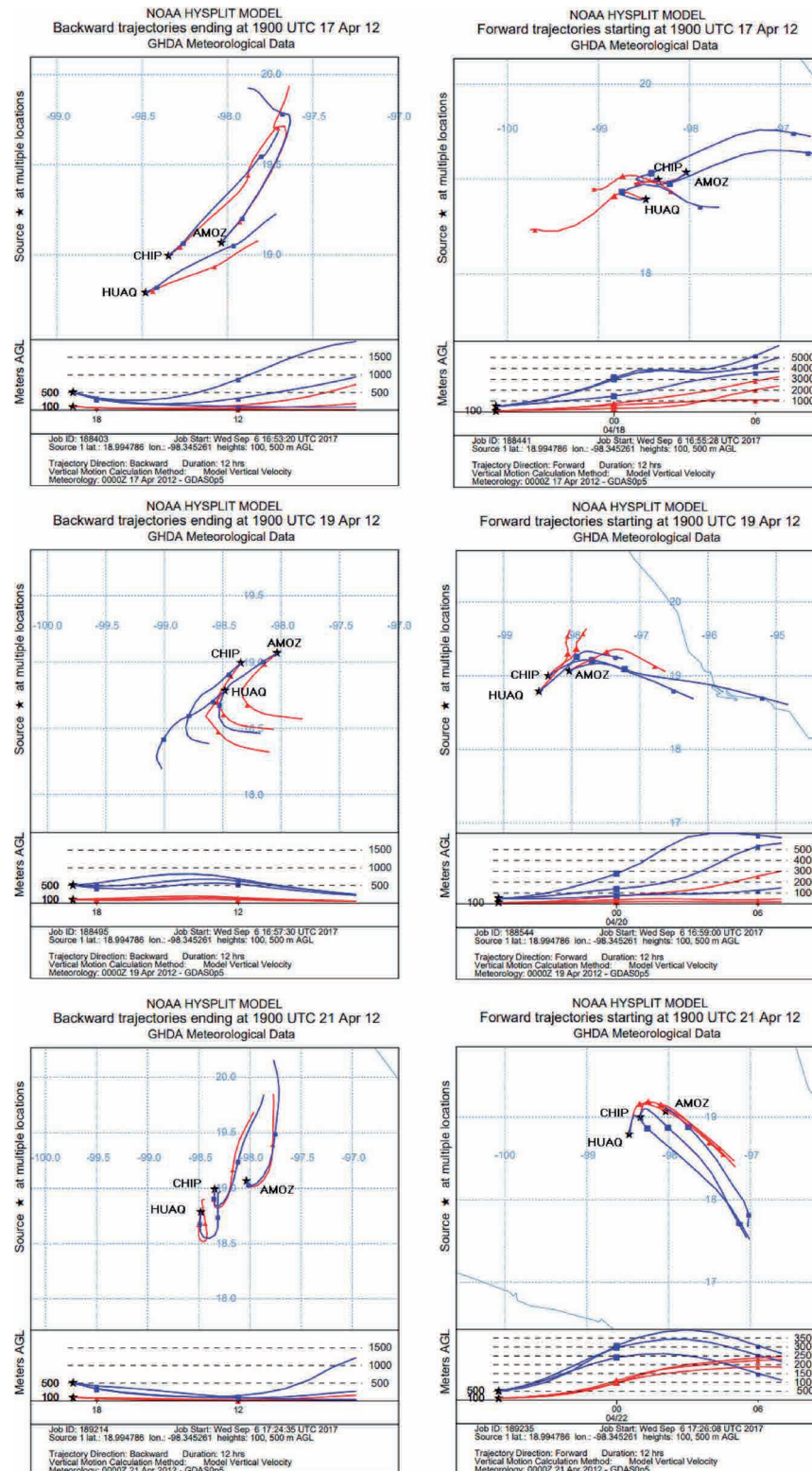


Fig. 8. Trayectorias de retroceso (panel izquierdo), y de avance (panel derecho), para los días 17, 19 y 21 de abril de 2012 a las 13:00 h (hora local), con niveles de alturas de arriba o inicio de las parcelas de aire sobre el nivel del suelo a los 100m (color rojo) y 500 m (color azul), usando el modelo HYSPLIT de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

masas de aire continuaron con ese giro en dirección al NE-E-SE en ascenso sobre la Sierra Madre Oriental.

El día 21 continúa la influencia del sistema sinóptico de alta presión que se distingue con la recirculación de masas de aire mostrada en las TR, aunque ya debilitado. Las parcelas de aire provienen del N-NE con respecto al VPT con trayectorias que inician en general por abajo de los 500 m de altura sobre la superficie media, por lo que pudieron acarrear O_3 y precursores provenientes de la zona conurbada de Tlaxcala, siendo su mayor su influencia en AMOZ, mientras que en HUAQ y CHIP la mayor contribución pudo provenir de la recirculación de O_3 fresco de la propia zona urbana de Puebla. La recirculación es prácticamente sobre el centro del VPT tal y como lo muestran las TA, estableciendo un flujo del SO al NNE que pudo estar enriquecido con contribuciones del VCC. Entrada la noche las parcelas se ubican ya en ascenso hacia el SE sobre la Sierra Madre Oriental.

A diferencia de las trayectorias de la **figura 8** cuya hora de llegada y partida a los sitios de estudio es a las 13:00 h (hora local), las trayectorias de la **figura 9** presentan las TR estimadas con llegada a las 20:00 h (hora local) a los sitios de estudio para los tres sitios durante la ocurrencia de eventos nocturnos. Las parcelas de aire que pasaron sobre la zona de estudio en ambos niveles (100 y 500 m) a las 20:00 h el 17 de abril aún provienen del NE del VPT, igual que las parcelas que previamente se analizaron para las 13:00 h. Dos de las parcelas con arribo en los 500 m en el análisis de trayectorias de las 20:00 h, se ubicaban a más de 2000 m de altura (~ 4100 msnm) 12 h antes, mientras que 4 h antes de pasar por los sitios, las parcelas ya se ubicaban dentro del nivel de los 500 m. Las masas de aire en el nivel de los 100 m prácticamente se mantuvieron por debajo de este nivel. Por ello es factible que el O_3 , tanto de la troposfera libre como de las masas de aire, se mantuviera recirculando en el VPT durante la tarde del 17 de abril, y de esta manera haya contribuido a mantener niveles relativamente altos de O_3 al anochecer. Para el 19 de abril, con condiciones de alta presión, las trayectorias de masas de aire que llegan en la noche a los tres sitios sugieren claramente la contribución de O_3 de la troposfera libre y del VCC en los dos niveles de arribo. En este caso, las que pasan al nivel de 500 m, provenían 6 h antes de por arriba de los 1000 m de altura (~ 3100 msnm), mientras que las del nivel de 100 m por arriba de aproximadamente 300 m (~ 2400 msnm). Estas últimas pudieron acarrear de regreso el O_3 que horas antes había sido transportado hacia el SO del VPT. En cuanto al evento nocturno del 21 de abril, se observa una posible confluencia de masas de aire del NE-N

para AMOZ y del SE en CHIP y HUAQ. Las TR de las masas de aire que arribaron en los niveles de 100 m y 500 m en CHIP y HUAQ se mantuvieron bajo transporte advectivo cerca de la superficie recolectando O_3 que había sido recirculado durante el día dentro del VPT y que al atardecer se expandieron dentro de la capa de mezcla poco antes de pasar por estos sitios.

DISCUSIÓN

Los resultados de las mediciones realizadas muestran que el valle de Puebla está siendo en general receptor de parcelas ricas en O_3 ajenas a la ZMVPT, en combinación con la recirculación de niveles de este contaminante que es retornado al VPT. Asimismo, se observa que los vientos en la altura provenientes del Pacífico influyen con mayor intensidad sobre los niveles de O_3 en superficie que los provenientes del norte y Golfo de México. La **figura 10** muestra la serie de tiempo y la relación entre las concentraciones de O_3 , NO_2 y dirección del viento de las concentraciones de O_3 observadas los días 17, 19 y 21 de abril. Se observa que hay similitud en los perfiles de O_3 en los tres sitios desde aproximadamente las 07:00 h con un nivel de O_3 más bajo para el día 19 de abril y más alto para el 21 de abril. Asimismo, se observan algunas diferencias en la rapidez del incremento en este contaminante, ocurriendo el máximo más temprano durante la condición sinóptica de transición (17 de abril), que durante la influencia de alta presión (19 de abril y 21 de abril). Se hace una discusión más detallada de cada uno de los días en los siguientes párrafos.

17 de abril

Este día el viento dominante tanto en superficie como en la altura fue del NE-N y los niveles diurnos de O_3 fueron relativamente bajos, indicando un transporte de masas de aire del norte del Golfo de México hacia el VPT. De acuerdo con la **figura 10**, durante la madrugada el viento provino del N en AMOZ; del sector N-NE-E en CHIP; y del NE en HUAQ, con niveles de O_3 remanentes cercanos a la concentración de fondo del orden de ~ 0.040 ppm en AMOZ, de cerca de 0.050 ppm para CHIP, y por arriba de 0.060 ppm en HUAQ. Por la mañana, la mayor concentración de NO_2 se observa en CHIP por la influencia de la Ciudad de Puebla, aunque sus niveles apenas alcanzan 0.040 ppm. Por comparación con la CDMX, en esta zona urbana se registran niveles del orden de 0.100 a 0.120 ppm de NO_2 durante la mañana (SEDEMA 2018). La producción y acumulación de O_3 inicia poco después de las 07:00 h

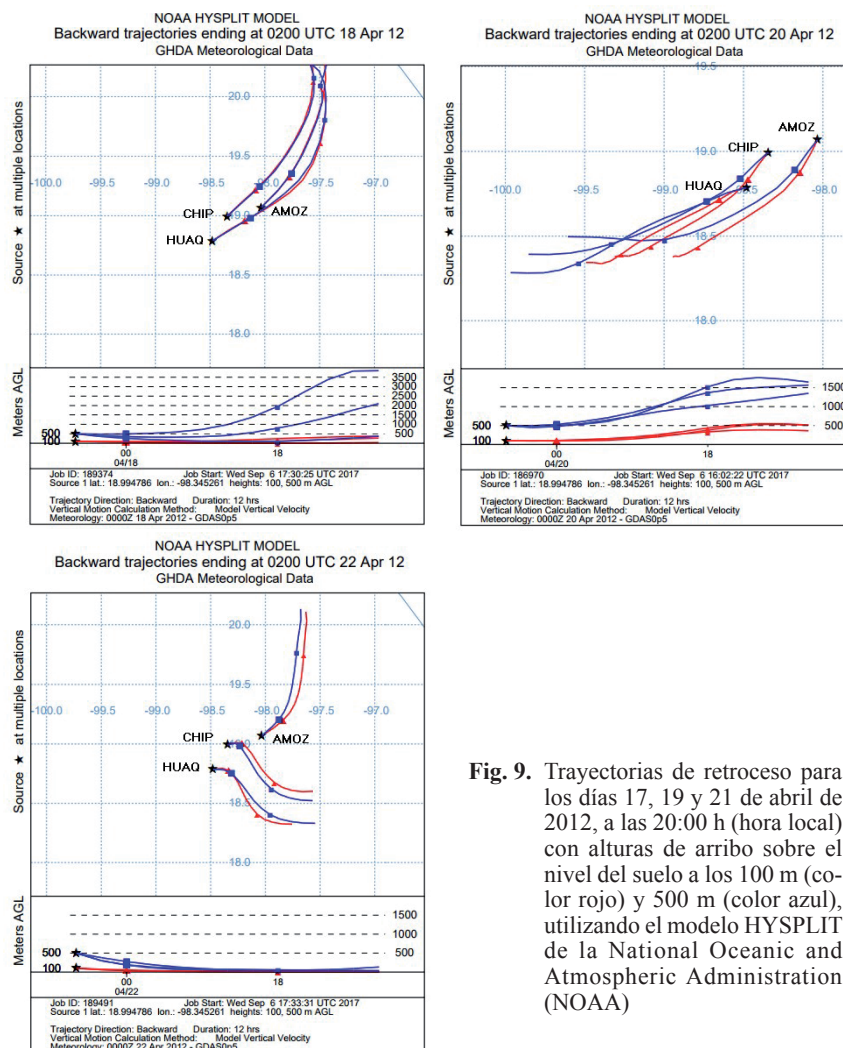


Fig. 9. Trayectorias de retroceso para los días 17, 19 y 21 de abril de 2012, a las 20:00 h (hora local) con alturas de arribo sobre el nivel del suelo a los 100 m (color rojo) y 500 m (color azul), utilizando el modelo HYSPLIT de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

en los tres sitios. Sin embargo, la rapidez de su incremento observado entre las 08:00 h y cerca de las 11:00 h, no parecen estar acorde al NO_2 disponible para alcanzar las concentraciones de O_3 registradas, por lo que la posibilidad alterna más viable pudo ser la adición de O_3 remanente en la altura por mecanismo de acarreo hacia la superficie cuando se rompe la capa de inversión. Este efecto se observa con el cambio de dirección del viento en AMOZ y la caída súbita de NO_2 por efecto de dilución en los tres sitios. Este proceso de acarreo persiste hasta cerca del mediodía siendo la rapidez de acumulación de O_3 muy similar en los tres sitios. El máximo de O_3 se registró aproximadamente a las 11:00 h y con mayor concentración en HUAQ debido al efecto acumulativo de O_3 en las parcelas de aire tanto del O_3 recién formado como del mezclado de las capas

superiores conforme estas se desplazaron a lo largo de la trayectoria en dirección NE a SO.

Después de un pico de O_3 registrado en los tres sitios cerca de las 12:00 h, los niveles de O_3 disminuyen y permanecen prácticamente en la misma concentración en los tres sitios hasta antes de las 18:00 h cuando ocurre un nuevo cambio, situación previamente asociada a la recirculación de parcelas de aire en el VPT. Mientras que en AMOZ hay una clara influencia de remoción de O_3 por abundancia de NO , que se refleja en una mayor concentración de NO_2 . En CHIP y HUAQ las concentraciones de O_3 se sostienen un mayor tiempo por arriba de las 0.050 ppm, al no existir emisiones de NO en abundancia. Las trayectorias de las 20:00 h mostradas en la **figura 9** explican el posible origen de los niveles nocturnos de O_3 mediante acarreo de capas superiores.

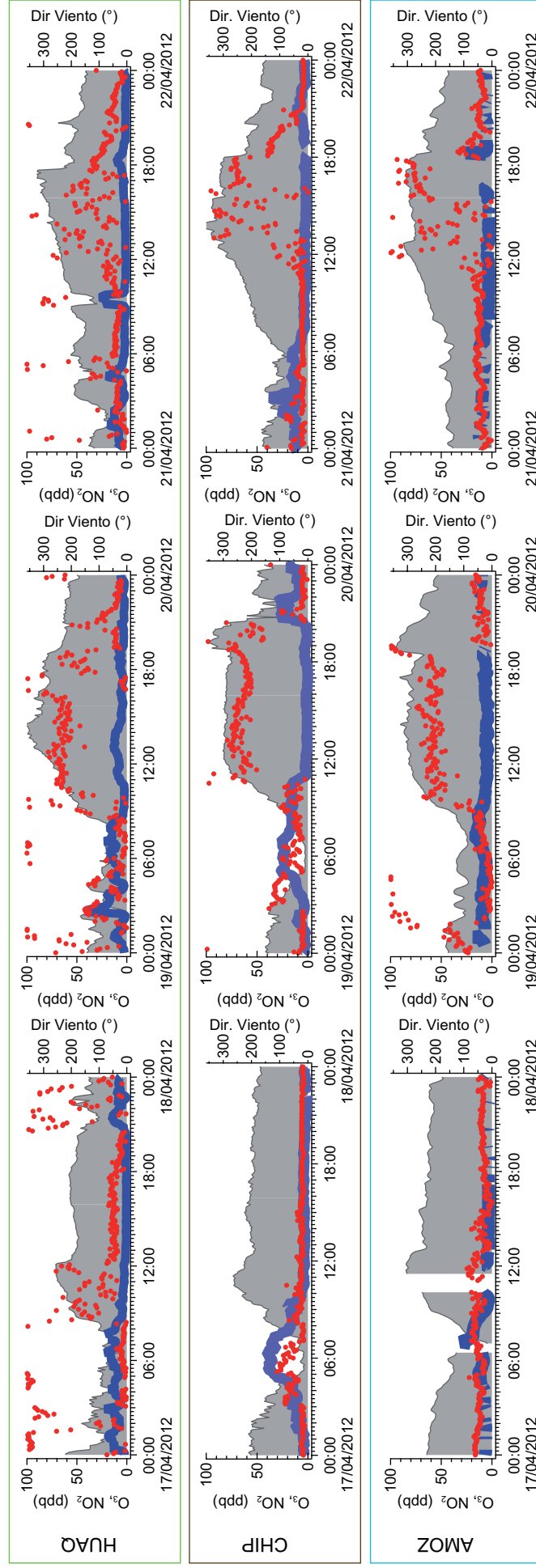


Fig. 10. Concentraciones de O_3 (área gris) y NO_2 (línea azul), con respecto a la dirección del viento (marcadores rojos) en AMOZ, CHIP y HUAQ para los días 17, 19 y 21 de abril de 2012.

19 de abril

El viento dominante durante la madrugada fue del N-NE registrándose valores de O_3 por abajo de la concentración de fondo, lo que sugiere que diversos mecanismos nocturnos de remoción como la titulación con NO fueron comunes en el valle, siendo más notable en torno a AMOZ. Al amanecer este fenómeno fue ligeramente más intenso en AMOZ y CHIP, aunque los niveles de NO_2 apenas rebasaron las 0.020 ppm. El efecto del rompimiento de la capa de inversión y del acarreo a la superficie de O_3 atrapado arriba de la capa de inversión se aprecia entre las 07:00 y las 08:00 h con la ocurrencia de un incremento súbito en O_3 . La rapidez de incremento de O_3 fue abrupta y muy similar en los tres sitios y se sostuvo mientras la dirección de proveniencia del viento fue del NE, tal y como ocurrió el día 17 de abril. Sin embargo, cerca de las 11:00 h se identifica un cambio completo en la dirección del viento del NE al SSO-SO que es registrado en los tres sitios y que es observado en las trayectorias de retroceso de la **figura 8**. Las parcelas de aire que horas antes se dirigían al SO vienen ahora de regreso en el proceso de recirculación identificado acompañadas con un incremento adicional en los niveles de O_3 , posiblemente de ozono envejecido sumado al ozono fresco del nuevo día.

Este día se registra un aumento de O_3 poco después de las 13:00 h en los tres sitios una vez establecido el flujo del SO con la adición de O_3 regional al recirculado. En HUAQ el aumento para la hora antes señalada alcanza el orden de las 0.080 ppm; en tanto que en CHIP casi se alcanzan las 0.090 ppm, mientras que en AMOZ las parcelas enriquecidas con O_3 de la Ciudad de Puebla hacen que los niveles de O_3 lleguen por arriba de las 0.100 ppm. Después de este periodo ya no hay mayor acumulación de O_3 por aproximadamente 5 h más y en los tres sitios continúan arribando parcelas de aire recirculadas del VPT conteniendo del orden de 0.070 ppm de O_3 . No obstante, al anochecer ocurre un repentino cambio en la dirección del viento. Mientras que en AMOZ y HUAQ se establece un flujo del NE, en CHIP el viento proviene todavía del sector SSO-SSE. Si bien, en AMOZ este cambio en la dirección va acompañado con una reducción en el contenido de O_3 en las parcelas de aire, debido a la posibilidad de que el viento provenga de una zona rural sin aportes de esta especie, en CHIP y HUAQ hay un incremento súbito inusual de O_3 que alcanza poco más de 0.090 ppm entre las 19:00 y las 20:00 h. El análisis de trayectorias de retroceso del evento nocturno (**Figura 8**) identificó la posible intrusión de O_3 de la tropósfera libre asociado a un proceso

convectivo de plegamiento de la tropopausa. Durante este fenómeno se puede introducir, por periodos cortos de tiempo, O_3 de la estratósfera hacia la tropósfera baja, a niveles aún por abajo de los 3000 m sobre el nivel del mar (Reid y Vaughan 2004, Mavrakakis et al. 2010).

Poco después del máximo nocturno, en AMOZ y HUAQ hay una remoción paulatina de O_3 dominada por mecanismos de depósito en superficie dados los bajos niveles de NO_x en esos sitios, mientras que en CHIP se observa el paso de parcelas de aire provenientes de la ciudad de Puebla con evidencia de titulación al registrarse una anticorrelación entre los NO_x y el O_3 . Para la medianoche los niveles de O_3 se estabilizan en torno al valor de la concentración de fondo en los tres sitios.

21 de abril

Durante la madrugada los niveles de O_3 en AMOZ fueron relativamente constantes, mientras que en CHIP y HUAQ se observan fuertes variaciones posiblemente asociadas a la presencia de NO_x emitidas por fuentes locales cercanas. Durante este periodo y hasta al amanecer dominaron vientos provenientes del norte.

Una vez que amanece hay un rápido incremento en las concentraciones de O_3 en los tres sitios en comparación con los dos días previamente analizados. Esto pudo deberse a que este día fue un día inhábil cuando las emisiones matutinas de NO_x son menores a las de los días hábiles. En consecuencia, la titulación del O_3 por la mañana se reduce y hay mayor acumulación de este contaminante. Destaca en los tres sitios que a pesar de que hay un crecimiento efectivo de las concentraciones de O_3 desde el amanecer al mediodía, los picos matutinos de NO_2 no superaron las 0.040 ppm y disminuyen rápidamente después de las 09:00 h. El incremento rápido de la concentración de O_3 en los tres sitios nuevamente puede explicarse con un acarreo de O_3 de arriba de la capa de mezcla a la superficie al desarrollarse ésta durante la mañana.

Los máximos de O_3 en CHIP y HUAQ se observaron alrededor de las 12:00 h conforme la proveniencia del viento fue del sector sur-suroeste de acuerdo con la recirculación de masas de aire sobre el VPT detectado con las respectivas TR. El gráfico de las trayectorias de retroceso y avance de la **figura 8** muestra claramente este fenómeno. La tendencia de incremento en el O_3 continuó por otras 6 h en AMOZ, mientras que en CHIP y HUAQ se sostuvieron concentraciones elevadas por un periodo de tiempo similar, para después disminuir las

concentraciones hasta unas 0.050 ppm. Después de las 18:00 h se registró el máximo de O₃ en AMOZ en tanto que, en los otros dos sitios, la tendencia de registros constantes de O₃ que se mantenía, se descompone y los niveles tienden a reducirse. Esta caída va asociada a un cambio en la dirección del viento ahora proveniente del ESE-E-ENE, situación que se sostiene todavía algunas horas más tarde tal y como lo muestran las trayectorias de la **figura 9** con arribo a las 20:00 h de este día.

En los tres días caso analizados se observa una influencia de O₃ de la tropósfera libre en algún momento del día que logra mezclarse con parcelas de aire a nivel superficie llevando al incremento en los niveles de este contaminante en los sitios rurales estudiados. Thompson et al. (2008) estudiaron la influencia del O₃ en la tropósfera libre sobre la región centro-norte de México con aviones instrumentados durante la campaña MILAGRO de 2006 y propusieron que el O₃ en la vertical puede presentar ciertas contribuciones a los niveles de superficie de este contaminante. Sin embargo, no se había confirmado la influencia de este fenómeno en la región centro-sur del país. El análisis que realiza Thompson et al. (2008) del posible origen de este O₃, indica que consistentemente proviene del SO, del Océano Pacífico y en ocasiones del Golfo de México, dependiendo de la posición del sistema de alta presión. Los hallazgos de la presente investigación confirman en una buena parte lo propuesto por Thompson et al. (2008) y resaltan la importancia que estos mecanismos de mezclado pueden tener en los niveles de O₃ superficiales en cuencas atmosféricas abiertas del centro de México y cuan significativo debe ser la consideración del transporte de masas de aire ricas en O₃ en las propuestas de estrategias de control de las zonas urbanas de esta región.

CONCLUSIONES

No obstante que los sitios HUAQ, CHIP y AMOZ se encuentran relativamente cercanos a la zona metropolitana de Puebla, además de estar alineados en las trayectorias de los flujos dominantes de los vientos, no se aprecia que esta área urbana influya notablemente en la acumulación del O₃ observado en estos sitios. Sin embargo, se observaron constantes similitudes tanto en los niveles de concentración registrados como en la dinámica de la rapidez en el incremento de O₃ medido en los tres sitios que está claramente asociada con la incorporación a la superficie de O₃ atrapado por arriba de la capa de

inversión. Mientras que la recirculación de masas de aire en el VPT lleva a niveles relativamente altos de O₃, las mayores concentraciones de ozono se encuentran ligadas fuertemente con la dominancia de vientos regionales vespertinos del SO combinado con contribuciones de O₃ de la troposfera libre acarreados en las parcelas de aire.

La interpretación de los perfiles verticales de O₃ para los eventos analizados entre el 17 y 21 de abril con características especiales representativas del tipo de meteorología de la región, confirma que la incorporación de O₃ de capas con relativamente alto contenido de este contaminante hacia la superficie al romperse la capa de inversión nocturna y desarrollarse la capa de mezcla, constituye un factor importante en la ocurrencia de niveles altos.

Queda demostrado que las emisiones de precursores de O₃ en el VPT no son los únicos responsables de los niveles vespertinos sostenidos de O₃ observados en esa región, sino que la combinación entre la formación fotoquímica local, el intercambio entre cuencas, los mecanismos de acarreo de esta especie en la altura, y la influencia sinóptica principalmente de sistemas de alta presión en la recirculación de masas de aire, parecen ser el factor dominante en la persistencia de estos niveles. La implicación de este hallazgo en términos de contaminación por O₃ regional y su control, radica en que, si bien hay contribución antrópica a la formación local de O₃, las contribuciones externas llevan a la ocurrencia persistente de un mínimo constante de concentración de este contaminante que no sea posible reducir, aún con medidas estrictas que abarquen a la megalópolis del centro de México.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto “Determinación de tasas de emisión de gases de efecto invernadero de las fuentes de áreas naturales y antropogénicas e identificación de zonas forestales vulnerables del municipio de Puebla y su zona metropolitana al impacto indirecto potencial del cambio climático regional y global” de los Fondos Mixtos del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de Puebla 77293 (CONACYT/FOMIX-Puebla 77293). Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el otorgamiento de la beca de posgrado; al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) por el préstamo de su unidad móvil; al Ing. Eduardo Figueroa del Olmo de la empresa TAISA por su apoyo en la preparación de la unidad móvil de la Universi-

dad Nacional Autónoma de México y a la M. en C. Bertha Eugenia Mar Morales por la generación de mapas con sistema de información geográfica.

REFERENCIAS

- CAMe (2017). Programa de gestión federal para mejorar la calidad del aire de la Megalópolis, PROAIRE 2017-2030. Comisión Ambiental de la Megalópolis [en línea]. https://framework-gb.cdn.gob.mx/data/institutos/semarnat/Programa_de_Gestión_Federal_2017-2030_final.pdf 12/04/2018
- de Foy B., Caetano E., Magaña V., Zitácuaro A., Cárdenas B., Retama A., Ramos A., Molina L.T. y Molina M.J. (2005). Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign. *Atmos. Chem. Phys.* 5 (3), 2503-2558. DOI: 10.5194/acp-5-2267-2005
- de Foy B., Varela J.R., Molina L.T. y Molina M.J. (2006). Rapid ventilation of the Mexico City basin and regional fate of the urban plume. *Atmos. Chem. Phys.* 6, 2321-2335. DOI: 10.5194/acp-6-2321-2006
- de Foy B., Fast J.D., Paech S.J., Phillips D., Walters J.T., Coulter R.L., Martin T.J., Pekour M.S., Shaw W.J., Kastendeuch P.P., Marley N.A., Retama A. y Molina L.T. (2008). Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis. *Atmos. Chem. Phys.* 8, 1209-1224. DOI: 10.5194/acp-8-1209-2008
- DIAU-BUAP (2008). Clima y urbanización en el Valle de Puebla. Departamento de Investigaciones Arquitectónicas y Urbanísticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla [en línea]. <http://urban.diau.buap.mx/proyecto.php> 29/01/14
- Doran J.C., Barnard J.C., Arnott W.P., Cary R., Coulter R., Fast J.D., Kassianov E.I., Kleinman L., Laulainen N.S., Martin T., Paredes-Miranda G., Pekour M.S., Shaw W.J., Smith D.F., Springston S.R. y Yu X-Y. (2007). The T1-T2 study: evolution of aerosol properties downwind of Mexico City. *Atmos. Chem. Phys.* 7, 1585-1598. DOI: 10.5194/acp-7-1585-2007
- Draxler R.R. y Rolph G.D. (2015). HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY [en línea]. <https://www.ready.noaa.gov/hypub-bin/trajtype.pl?runtype=archive> 19/03/2018
- Fast J.D. y Zhong S. (1998). Meteorological factors associated with inhomogeneous ozone concentrations within the Mexico City basin. *J. Geophys. Res.* 103 (D15), 18927-18946.
- Finlayson-Pitts B. y Pitts Jr. J. (2000). Chemistry of the upper and lower atmosphere. Academic Press, San Diego, California, EUA, 969 pp.
- INE (2007). Identificación de cuencas atmosféricas en México (INE/A1-011/2007). Informe Final. Instituto Nacional de Ecología, Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire. [en línea]. <http://studylib.es/doc/7839422/informe-disponible-en-formato-pdf--instituto-nacional-de> 20/03/2018
- INE (2009). Comportamiento de los contaminantes en cuencas atmosféricas: metodología y estudio de caso (INE/A1-004/2009). Informe Final. Instituto Nacional de Ecología [en línea]. <http://docplayer.es/13255030-Direccion-general-de-investigacion-sobre-la-contaminacion-urbana-y-regional-dgicur-direccion-de-investigacion-sobre-la-calidad-del-aire-dica.html> 20/03/2018
- INE (2011). Diagnóstico sobre compuestos tóxicos en aire ambiente y caracterización espacial de fuentes de emisión y meteorología en la Región Fronteriza de Baja California Norte. (INE/ADE 038/2010). Instituto Nacional de Ecología [en línea]. <http://studylib.es/doc/8086623/estudio-de-caso-de-la-contaminaci%C3%B3n-en-la-cuenca-atmosf%C3%A9rica> 20/03/2018
- INEGI (2010). Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía [en línea]. <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825003884> 27/03/2018
- Jáuregui E.O. (1968). Mesoclima de la región Puebla-Tlaxcala. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México, 31 pp.
- Jazcilevich-Diamant A., García-Reynoso A. 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. DOI: 10.1016/S1352-2310(02)00893-2
- Jiménez J., Raga G., Baumgardner D., Castro T., Rosas I., Baez A. y Morton O. (2004). On the composition of airborne particles influenced by emissions of the volcano Popocatepetl in Mexico. *Nat. Hazards*. 31 (1), 21-37. DOI: 10.1023/B:NHAZ.0000020254.46521.f9
- Kley D., Gneiss H. y Volker A.M. (1994). Tropospheric ozone at elevated sites and precursor emissions in the United States and Europe. *Atmos. Environ.* 28 (1), 149-158. DOI: 10.1016/1352-2310(94)90030-2
- Krupa S. (1999). Polución, población y plantas. Montecillo, Colegio de Posgraduados Chapingo. Estado de México, México, 184 p.
- Lauer W. y Klaus D. (1975). The thermal circulation of the central Mexican meseta region within influence of the trade winds. *Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B*. 23 (4), 343-366. DOI: 10.1007/BF02242690
- Lewandowski P.A., Eichinger W. E., Holder H., Prueger J., Wang J. y Kleinman L.I. (2010). Vertical distribution of aerosols in the vicinity of Mexico City during MILAGRO-2006 campaign. *Atmos. Chem. Phys.* 10, 101-130. DOI: 10.5194/acp-10-1017-2010

- Márquez C., Castro T., Muhlia A., Moya M., Martínez-Arroyo A. y Báez A. (2005). Measurement of aerosol particles, gases and flux radiation in the Pico de Orizaba National Park, and its relationship to air pollution transport. *Atmos. Environ.* 39 (21), 3877-3890. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.03.015
- Mavrikakis A., Flocas H.A., Mavromatidis E., Kallos G., Theoharatos G. y Christides A. (2010) A case of night-time high ozone concentration over the greater Athens area. *Meteorologische Zeitschrift* 19 (1), 35-45. DOI: 10.1127/0941-2948/2010/0428
- Melamed M.L., Basaldud R., Steinbrecher R., Emeis S., Ruiz-Suárez L.G. y Grutter M. (2009). Detection of pollution transport events southeast of Mexico City using ground-based visible spectroscopy measurements of nitrogen dioxide. *Atmos. Chem. Phys.* 9, 4827-4840. DOI: 10.5194/acp-9-4827-2009
- Mena-Carrasco M., Carmichael G.R., Campbell J.E., Zimmerman D., Tang Y., Adhikary B., D'allura A., Molina L.T., Zavala M., García A., Flocke F., Campos T., Weinheimer A.J., Shetter R., Apel E., Montzka D.D., Knapp D.J. y Zheng W. (2009). Assessing the regional impacts of Mexico City emissions on air quality and chemistry. *Atmos. Chem. Phys.* 9, 3731-3743. DOI: 10.5194/acp-9-3731-2009
- Molina L.T., Kolb C.E., de Foy B., Lamb B.K., Brune W.H., Jimenez J.L. y Molina M. (2007) Air quality in North America's most populous city –overview of the MCMA-2003 campaign. *Atmos. Chem. Phys.* 7, 2447-2473. DOI: 10.5194/acp-7-2447-2007
- Molina L.T., Madronich S., Gaffney J.S., Apel E., de Foy B., Fast J., Ferrare R., Herndon S., Jimenez J.L., Lamb B., Osornio-Vargas A.R., Russell P., Schauer J.J., Stevens P.S., Volkamer R. y Zavala M. (2010). An overview of the MILAGRO 2006 campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation. *Atmos. Chem. Phys.* 10, 8697-8760. DOI: 10.5194/acp-10-8697-2010
- NREL (2002). Weekend/weekday ozone observations in the South Coast Air Basin-Analysis of air quality data. National Renewable Energy Laboratory. Reporte Final. Reno Nevada, EUA, 32 pp.
- Padilla V. (2014). Variabilidad temporal de hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs) en un sitio receptor del Valle Puebla-Tlaxcala: Campaña de monitoreo FO-MIX-CONACYT 2012. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México, 108 p.
- Reid H.J. y Vaughan G. (2004). Convective mixing in a tropopause fold. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 130 (599), 1195-1212. DOI: 10.1256/qj.03.21
- Rolph G., Stein A. y Stunder B. (2017). Real-time environmental applications and display system: READY. *Environ. Modell. Softw.* 95, 210-228. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.06.025
- Ruiz-Suárez L., Torres R., Steinbrecher R., Junkerman W., Torres-Jaramillo A., Mar B. y Hernández-Solís J. (2006). Observations at Tenango del Aire II (chemistry). *Memorias. Primera reunión científica de la campaña MILAGRO*, Boulder Colorado, EUA. 23 al 25 de octubre, 2006. Cartel.
- Ruiz-Suárez L.G., Torres-Jardón R., Jazcilevich-Diamant A., García-Reynoso A., Grutter M., Torres-Jaramillo A., Morales B., Steinbrecher R., Junkermann W. y Molina L. (2009). Analysis of observations and modeling of criteria pollutants and photochemical age indicators during MILAGRO at Tenango del Aire. *Memorias. European Geosciences, Union General Assembly*, Viena, Austria. 22 al 27 de abril, 2012. CD-ROM.
- Ruiz-Suárez L.G., Torres-Jardón R., Woernschimmel H., Steinbrecher R., Junkerman W., Nigenda E., García-Reynoso A., Melamed M., Jazcilevich A., Mar-Morales B., Grutter M. y Molina L. (2010). In depth analysis of the role of the mountain gap south of the Valley of Mexico on the air quality in Mexico City. *Memorias. European Geosciences Union, General Assembly*, Viena, Austria. 2 de mayo, 2010. CD-ROM.
- Salcedo D., Castro T., Ruiz-Suárez L.G., García-Reynoso A., Torres-Jardón R., Torres-Jaramillo J.A., Mar-Morales B.E., Salcido A., Celada A.T., Carreón-Sierra S., Martínez A.P., Fentanes-Arriaga O.A., Deustúa E., Ramos-Villegas R., Retama-Hernández A., Saavedra M. I. y Suárez-Lastra M. (2012). Study of the regional air quality south of Mexico City (Morelos state). *Sci. Total. Environ.* 414, 417-432. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.09.041
- SEDEMA (2018). Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México: Base de datos derivados del monitoreo atmosférico por contaminantes para el año 2012 [en línea]. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aKBhnmI=%27&opcion=Zg==24/04/2018 06/03/2018>.
- Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D. y Ngan F. (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 96, 2059-2077. DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00110.1
- SSA (2014). Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014. Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Secretaría de

- Salud. Diario Oficial de la Federación. México, 19 de agosto de 2014.
- Thompson A.M., Yorks J.E., Miller S.K., Witte J.C., Dougherty K.M., Morris G.A., Baumgardner D., Ladino L. y Rappengluck B. (2008). Tropospheric ozone sources and wave activity over Mexico City and Houston during MILAGRO/Intercontinental Transport Experiment (INTEX-B) Ozonesonde Network Study, 2006 (IONS-06). *Atmos. Chem. Phys.* 8, 5113-5125. DOI: 10.5194/acp-8-5113-2008
- Torres-Jardón R., Reynoso-García A., Jazcilevich A. y Ruíz-Suárez L. (2009). Assessment of the ozone-nitrogen oxide-volatile organic compound sensitivity of Mexico City through an indicators-based approach: measurements and numerical simulations comparison. *J. Air. Waste. Manag. Assoc.* 59 (10), 1155-1172. DOI: 10.3155/1047-3289.59.10.1155