



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
AMBIENTAL – AIRE**

**CONTINGENCIAS ATMOSFÉRICAS POR OZONO TROPOSFÉRICO
EN LA ZONA METROPOLITANA DE CIUDAD DE MÉXICO.**

Tesis

**Que para optar por el de grado de:
MAESTRO EN INGENIERÍA**

PRESENTA:

Lic. Milena Lemes Rosales

TUTOR PRINCIPAL:

Dr. Rodolfo Sosa Echeverría, CCA. UNAM

COMITÉ TUTOR

Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda, Instituto de Geografía. UNAM

M. C. Vicente Fuentes Gea, Facultad de Ingeniería. UNAM

Dr. Armando Aguilar Márquez, FES, Cuautitlán. UNAM

Dra. Mónica Jaimes Palomera, SIMAT

**Ciudad de México, México
Junio, 2019**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Víctor O. Magaña Rueda

Secretario: M. C. Fuentes Gea Vicente

Vocal: Dr. Aguilar Márquez Armando

1^{er.} Suplente: Dra. Jaimes Palomera Mónica Del C.

2^{d o.} Suplente: Dr. Sosa Echeverría Rodolfo

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Sección de Contaminación Ambiental - Centro de Ciencias de la Atmósfera -
Universidad Nacional Autónoma De México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Rodolfo Sosa Echeverría

FIRMA

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

Las concentraciones horarias de ozono troposférico en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) exceden casi a diario la norma mexicana de calidad del aire (NOM-020-SSA1-2014, 19 de agosto de 2014), la cual establece que no debe rebasar el valor límite de 0.095 ppm ninguna hora del año. La gran problemática es que las altas concentraciones de ozono en la atmósfera están propiciados por factores físico-geográficos y meteorológicos, ya que el área urbana se extiende sobre una cuenca semi-cerrada, la cual está sujeta de manera natural a condiciones que no favorecen una adecuada ventilación de la atmósfera. Si bien se han implementado y puesto en práctica programas y medidas para la reducción de las emisiones de sus precursores: NO_x y COV; es aún insuficiente, ya que desde finales de febrero y la primera semana de junio es común que cada año se presenten valores altos de ozono en las estaciones de la cuenca. En aras de mejorar el pronóstico de calidad del aire en la Ciudad se realizó esta investigación que emplea el método conocido como Self-Organizing Maps (SOM, por sus siglas en inglés) para la clasificación de los patrones sinópticos más frecuentes durante los episodios de altas concentraciones de dicho contaminante secundario en el período 2003-2016. SOM es un método de agrupamiento (análisis de conglomerados) sugerido por Kohonen y Maps (1995). Dentro del método se realizan una serie de procedimientos estadístico-matemáticos como son el reconocimiento de centroides para la confección de los conglomerados y la obtención de Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs, por sus siglas en inglés) para reconocer los patrones más frecuentes de acuerdo al porcentaje de varianza explicada (Kohonen, 2001). Se empleó la paquetería SOM Toolbox, en el lenguaje de programación MATLAB para la obtención de los patrones sinópticos sobre la región ya referida. Las dimensiones del arreglo matricial fueron de 308 x (101x201) que representa el número de días analizados en todos los puntos de la rejilla seleccionada como región de estudio. El análisis SOM para los valores de altura de geopotencial (km) de 700hPa permitió obtener 6 clústeres a partir de los datos de los 308 días encontrados en el periodo 2003-2016 que sobrepasaron el límite de 155 ppb (valor equivalente a 151 puntos del Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA) para ozono y se corresponde con la activación de la contingencia en la ZMCM). De los clústeres obtenidos fue posible determinar 8 situaciones sinópticas que propician mayormente los episodios de altas concentraciones de ozono entre los meses febrero a junio.

ABSTRACT

Hourly concentrations of tropospheric ozone in the Metropolitan Area of Mexico City (ZMCM) exceed the Mexican air quality standard almost every day (NOM-020-SSA1-2014, August 19, 2014), which establishes that the threshold of 0.095ppm must be exceeded. The big problem is that the high levels of ozone in the atmosphere are favored by physical-geographic and meteorological factors since the urban area extends over a semi-closed basin, which is subject in a natural way to conditions that do not favor an adequate ventilation of the atmosphere. Although programs and measures have been implemented and implemented to reduce emissions of precursors: NO_x and VOC; it is still insufficient, since during the ozone season and even in other months of the year ozone values continue to rise in the basin's stations. In order to improve the air quality forecast in the City, this research was carried out using the method known as Self-Organizing Maps (SOM) for the classification of the most frequent synoptic patterns during episodes of discharges. ozone concentrations in the period 2003-2016. The SOM method consists of an artificial neural network suggested by Kohonen and Maps (1995) based on unsupervised learning. Within the method a series of statistical-mathematical procedures are performed, such as the recognition of centroids for the confection of the clusters and the obtaining of Orthogonal Empirical Functions (EOFs) to recognize the most frequent patterns according to the percentage of variance explained (Kohonen, 2001). The SOM Toolbox package was used in the MATLAB programming language to obtain the synoptic patterns on the region already mentioned. The dimensions of the matrix array was 308 x (101x201) which represents the number of days analyzed in all points of the grid selected as the study region. The SOM analysis for the geopotential height values (km) of 700hPa allowed us to obtain 6 clusters from the data of the 308 days found in the period 2003-2016 that surpassed the threshold of 155 ppb (equivalent value to 151 points of the Index Metropolitan Air Quality (IMECA) for ozone and corresponds to the activation of the contingency in the ZMCM). From the clusters obtained it was possible to determine 8 synoptic situations that favor episodes of high concentrations of ozone between February and June.

CONTENIDO

.....	I
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN.....	V
ABSTRACT.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	XIV
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Problema científico.....	1
1.2 Justificación del trabajo.....	4
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Variabilidad climática	5
2.1 Meteorología sinóptica.....	6
2.1.1 Metodologías usadas para clasificar patrones sinópticos.	7
2.1.2 Aplicación de las clasificaciones sinópticas en estudios de contaminación atmosférica.....	10
2.2 Situación de calidad del aire en grandes urbes del mundo.....	11
2.3 Formación del ozono troposférico.....	12
2.4 Antecedentes de la química del ozono en Ciudad de México.	14
2.4.1 Emisiones de gases precursores de ozono.....	15
2.4.2 Compuestos orgánicos volátiles: fuentes y concentraciones	15
2.4.3 Fotoquímica urbana y regional.....	16
2.4.4 Otros estudios de calidad del aire realizados en la ZMCM	19
CAPÍTULO III. ASPECTOS FÍSICO-GEOGRÁFICOS Y METEOROLÓGICOS DE LA ZMCM.....	22

3.1 Área de estudio.....	22
3.2 Influencia de las variables y procesos meteorológicos en la contaminación atmosférica.	23
3.2.1 Islas de calor	23
3.2.2 Papel de la estabilidad atmosférica en la dispersión de los contaminantes atmosféricos.....	24
3.2.3 Papel de la capa de mezcla en la dispersión de los contaminantes.	25
3.2.4 Relación de la dispersión de contaminantes y los sistemas de la escala sinóptica.	26
3.2.5 Papel del viento en la dispersión de los contaminantes atmosféricos.....	27
CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA.....	30
4.1 Área de estudio.....	30
4.2 Datos de reanálisis de ERA Interim	31
4.3 Herramientas empleadas en el análisis sinóptico.	33
4.4 Diagramas termodinámicos.....	34
4.5 Método "SOM" para la obtención de patrones sinópticos.....	35
4.5.1 Pasos para el desarrollo del método SOM.....	36
CAPITULO V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	40
5.1 Patrones sinópticos en 700hPa asociados a las altas concentraciones de ozono troposférico en la ZMCM.....	40
5.1.1 Distribución temporal de los clústeres obtenidos con el método SOM en el período 2003-2016 para los meses Feb-Jun.	40
5.1.2 Análisis sinóptico y del vector del viento en superficie, de los patrones sinópticos asociados a los clústeres obtenidos.....	43
5.2 Análisis de un caso de estudio.	69
5.3 Observaciones generales y ejercicio de pronóstico meteorológico y de calidad del aire.	72
5.4 Estrategias para la prevención, minimización y control de contingencias atmosféricas por ozono.	74
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78
6.1 Conclusiones.	78
6.2 Recomendaciones.	79

CAPITULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
ANEXOS	87

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO II

- Figura 2.1 Interacción de los hidrocarburos con el ciclo fotolítico del dióxido de nitrógeno. 14
- Figura 2.2 Modelo conceptual de la circulación del viento en la ZMCM..... 18

CAPÍTULO IV

- Figura 4.1 Región de estudio para realizar el análisis sinóptico y su influencia sobre la ZMCM. 30
- Figura 4.2 Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). 31
- Figura 4.3 Mapa de flujo obtenido de EARTH..... 33
- Figura 4.4 Mapa sinóptico del Centro de Pronóstico del INSMET. 34
- Figura 4.5 Diagrama de Stüve del sondeo. 35
- Figura 4.6 Actualización de la Mejor Unidad de Coincidencia (BMU) y sus vecinos hacia la entrada simple marcada con X. Las líneas continuas y punteadas corresponden a la situación antes y después de la actualización, respectivamente. 37

CAPÍTULO V

- Figura 5.1 Clústeres de altura de geopotencial (gH) en 700 hPa para los días con altos valores de ozono troposférico (≥ 155 ppm) en el período 2003-2016 para los meses febrero- junio. 40
- Figura 5.2 Frecuencia de ocurrencia de cada clúster en el período..... 41
- Figura 5.3 Distribución mensual por clúster en el periodo de estudio. 42
- Figura 5.4 Histórico de los promedios mensuales de las concentraciones horarias de ozono. ... 43
- Figura 5.5 PSF1: Mapas de flujo del día 19 de febrero de 2016 a las 1800UTC para los niveles de presión de a) 700 hPa, b) 500 hPa, c) 200 hPa. 45
- Figura 5.6 Concentraciones horarias de ozono medidas en las estaciones de la RAMA. La escala muestra los valores de concentraciones en ppb. 46
- Figura 5.7 Campo de promedio para las horas indicadas: promedio para la mañana (7-12 horas) en el caso de la primera imagen y en el resto se muestra el promedio de la velocidad y dirección del viento durante la hora indicada para cada estación. El tamaño del vector es proporcional a la magnitud de la velocidad del viento..... 47
- Figura 5.8 PSM1: Mapas de flujo del día 12 de marzo de 2016 a las 1800UTC para los niveles de presión de: a) 700 hPa, b) 500 hPa, c) 200 hPa. 48
- Figura 5.9 Concentraciones horarias de ozono medidas en las estaciones de la RAMA. La escala muestra los valores en ppb..... 49
- Figura 5.10 Campo de promedio para las horas indicadas: promedio para la mañana (7- 12 horas) en el caso de la primera imagen y en el resto se muestra el promedio de la velocidad y dirección del viento durante la hora indicada para cada estación. El tamaño del vector es proporcional a la magnitud de la velocidad del viento..... 50

<i>Figura 5.11 PSMa2: Mapas de flujo del día 4 de mayo de 2016 a las 1800UTC para los niveles de presión: a) 700 hPa, b) 500 hPa, c) 200 hPa.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5.12 Concentraciones horarias de ozono medidas en las estaciones de la RAMA. La escala muestra los valores de concentración en ppb.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.13 Campo de viento para las horas indicadas: promedio para la mañana (7-12 horas) en el caso de la primera imagen y en el resto se muestra la velocidad y dirección del viento durante la hora indicada para cada estación. El tamaño del vector es proporcional a la magnitud de la velocidad del viento.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.14 PSMa3-1: Mapas de flujo del día 20 de mayo de 2016 a las 1800UTC para los niveles de presión de: a) 700 hPa, b) 500 hPa, c) 200 hPa.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.15 Concentraciones horarias de ozono medidas en las estaciones de la RAMA. La escala muestra los valores de concentración en ppb.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.16 Campo de viento para las horas indicadas: promedio para la mañana (7-12 horas) en el caso de la primera imagen y en el resto se muestra la velocidad y dirección del viento durante la hora indicada para cada estación. El tamaño del vector es proporcional al a magnitud de la velocidad del viento.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.17 PSMa3-3: Mapas de flujo del día 24 de mayo de 2016 a las 1800UTC para los niveles de presión de: a) 700 hPa, b) 500 hPa, c) 200 hPa.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5.18 Concentraciones horarias de ozono medidas en las estaciones de la RAMA. La escala muestra los valores de concentración en ppb.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.19 Campo de promedio para las horas indicadas: promedio para la mañana (7-12 horas) en el caso de la primera imagen y en el resto se muestra el promedio de la velocidad y dirección del viento durante la hora indicada para cada estación. El tamaño del vector es proporcional a la magnitud de la velocidad del viento.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.20 PSA4: Mapas de flujo del día 8 de abril de 2015 a las 1800UTC para los niveles de presión de: a) 700 hPa, b) 500 hPa, c) 200 hPa.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.21 Concentraciones horarias de ozono medidas en las estaciones de la RAMA. La escala muestra los valores de concentración en ppb.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.22 Campo de promedio para las horas indicadas: promedio para la mañana (7-12 horas) en el caso de la primera imagen y en el resto se muestra el promedio de la velocidad y dirección del viento durante la hora indicada para cada estación. El tamaño del vector es proporcional a la magnitud de la velocidad del viento.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.23 PSM4: Mapas de flujo del día 1 de marzo de 2016 a las 1800UTC para los niveles de presión de: a) 700 hPa, b) 500 hPa, c) 200 hPa.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 5.24 Concentraciones horarias de ozono medidas en las estaciones de la RAMA. La escala muestra los valores de concentración en ppb.</i>	<i>64</i>

<i>Figura 5.25 Campo de promedio para las horas indicadas: promedio para la mañana (7-12 horas) en el caso de la primera imagen y en el resto se muestra el promedio de la velocidad y dirección del viento durante la hora indicada para cada estación. El tamaño del vector es proporcional a la magnitud de la velocidad del viento.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 5.26 PSJ6: Mapas de flujo del día 12 de junio de 2014 a las 1800UTC para los niveles de: a) 700 hPa, b) 500 hPa, c) 200 hPa.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.27 Concentraciones Horarias de ozono medidas en las estaciones de la RAMA. La escala muestra los valores de concentración en ppb.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.28 Campo de viento promedio para las horas indicadas: promedio para la mañana (7-12 horas) en el caso de la primera imagen y en el resto se muestra el promedio de la velocidad y dirección del viento durante la hora indicada para cada estación. El tamaño del vector es proporcional a la magnitud de la velocidad del viento.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5. 29 Promedios horarios de las concentraciones de ozono para las estaciones activas, entre el 11 de marzo de 2016 y el 17 de marzo de 2016.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5. 30. Perfil de velocidades del viento en m/s de acuerdo a la escala.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5. 31. Comportamiento de los estadígrafos mínimo, máximo y mediana en todas las estaciones de monitoreo activas, para los días del 11 al 17 de marzo de 2016.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5. 32 Comportamiento de la temperatura para cada estación de monitoreo, 2003-2016 (de acuerdo a la suficiencia del 75% de los datos). Los puntos negros representan la media de los datos y la línea roja a la mediana.</i>	<i>74</i>

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO II

Tabla 2.1 Emisiones de COV y NOx de los últimos inventarios de emisiones.....22

CAPÍTULO IV

Tabla 4.1 Fases vigentes del PCAA para ozono, expresadas en unidades del Índice Metropolitano de Calidad del Aire y en unidades de concentración.....33

CAPÍTULO V

Tabla 5.1 Número de días por mes que se introdujo al método..... 42

GLOSARIO DE TÉRMINOS

BMU	Unidades Más Coincidentes
CDMX	Ciudad de México
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
ECMWF	Centro Europeo de Pronóstico del Tiempo a Mediano Plazo
EDOMEX	Estado de México
EOFs	Orthogonal Empirical Functions
EPA	Agencia de Protección Ambiental
FEO	Funciones Empíricas Ortogonales
GFS	Global Forcast Systems
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrógeno
HAP	Hydrocarbons aromatic polycyclic
HONO	Ácido nitroso
HCHO	Formaldehído
hPa	Hectopascales
HPS	Alta presión atmosférica
IMECA	Índice Metropolitano de Calidad del Aire
km	Kilometro
LPS	Baja presión atmosférica
Msl	Nivel medio del mar
Msnm	Metros sobre el nivel del mar
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NetCDF	Network Common Data Form
NO ₂	Dióxido de Nitrógeno
NO _x	Óxidos de Nitrógeno
O ₃	Ozono
PAN	Peroxiacetyl nitrate

PM ₁₀	Partículas de diámetro 10 µm
ppb	Partes por billón
RAMA	Red Automática de Monitoreo Atmosférico
SO ₂	Dióxido de azufre
SOM	Self-Organizing Maps
UTC	Universal Time Coordinated
UV	Ultravioleta
WR	Weather Regimes
WRF	Weather Research and Forecasting
ZMCM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Problema científico

El rápido crecimiento de las grandes ciudades ha provocado serios problemas de contaminación del aire urbano en muchos países en desarrollo. Por ejemplo, las concentraciones horarias de ozono troposférico en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) exceden casi a diario la norma mexicana de calidad del aire (NOM-020-SSA1-2014, 19 de agosto de 2014), la cual establece que no debe rebasar el valor límite de 0.095 ppm ninguna hora del año. Se han registrado concentraciones de ozono de 0.441 ppm durante los eventos más severos de contaminación del aire (Garfias y Gonzáles, 1992). A diferencia de las grandes ciudades de latitud media, los altos valores de este contaminante pueden ocurrir en cualquier momento durante todo el año porque la latitud subtropical (19.4°N) y la altitud (en promedio 2250 m sobre el nivel medio del mar, o msl) son propicias a la producción de ozono durante el invierno y el verano.

La temporada de altas concentraciones de ozono se inicia oficialmente en la última semana de febrero y concluye en junio. A finales de febrero la temperatura comienza a incrementarse, y las masas de aire frío arrastradas desde el norte del continente tienen un menor impacto en la temperatura de la Cuenca de México y los días despejados son cada vez más frecuentes. Durante este período, los niveles de ozono en el aire ambiente alcanzan concentraciones de riesgo durante prácticamente todos los días, entre las 13:00 y las 18:00 horas. Las zonas más afectadas son las que se ubican al sur de la ZMCM, esto se debe a que durante la mañana el viento arrastra los contaminantes hacia el suroeste de la ciudad, en donde las montañas de la Sierras de las Cruces y del Ajusco-Chichinautzin dificultan su dispersión (Informe Anual SEDEMA, 2015).

La primavera en la Ciudad de México se caracteriza por cielos despejados, lluvia escasa, temperatura confortable con días cálidos y noches frescas. La temperatura promedio es de alrededor de 19°C con máximos cercanos a los 30°C y mínimos de 15°C. El viento es escaso durante la mañana y moderado por la tarde. Estas condiciones, que propician un tiempo envidiable en otras latitudes, favorecen también la formación del ozono y del smog fotoquímico.

El ozono es un gas incoloro, sin embargo, en altas concentraciones es posible sentir su presencia en el aire ya que provoca ardor de ojos e irritación en la garganta, en personas asmáticas puede activar un episodio de asma.

Se ha demostrado que el ozono se forma de cientos de reacciones químicas entre los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos que emiten los millones de vehículos que circulan en la ciudad, las miles de industrias que operan en la zona metropolitana y el uso doméstico de combustible. Estas reacciones requieren de energía solar, es por eso que el ozono no se produce durante la noche.

El ozono está vinculado a un aumento en el número de ataques de asma, enfermedades respiratorias, visitas a las salas de emergencias y al hospital. En casos extremos se ha vinculado el incremento de ozono a la muerte prematura. Este contaminante puede ser particularmente dañino para los niños, los adultos mayores y las personas con enfermedades respiratorias como el asma y la bronquitis.

Lo peor es que los altos niveles de ozono en la atmósfera de la cuenca de la Ciudad de México están propiciados por factores físico-geográficos y meteorológicos. El área urbana se extiende sobre una cuenca semi-cerrada, la cual está sujeta de manera natural a condiciones que no favorecen una adecuada ventilación de la atmósfera. Entre los principales factores que afectan la calidad del aire destacan los siguientes:

- El entorno montañoso que rodea la cuenca constituye una barrera natural que dificulta la libre circulación del viento y la dispersión de los contaminantes. Por ello es un medio propicio para la acumulación de los contaminantes atmosféricos. Las montañas que delimitan la cuenca alcanzan una altitud promedio de 3,200 metros, con elevaciones que superan los 5,400 metros.
- Las inversiones térmicas que ocurren con frecuencia son un fenómeno natural que causa un estancamiento temporal de las masas de aire en la atmósfera. Ello inhibe la capacidad de autodepuración de ésta y favorece la acumulación de los contaminantes. El estancamiento perdura hasta que, al transcurrir el día y de manera gradual, la inversión térmica se rompe debido al calentamiento de la atmósfera, entonces los contaminantes se dispersan.
- Los sistemas anticiclónicos que se desplazan frecuentemente sobre la región centro del país, tienen la capacidad de generar condiciones de estabilidad atmosférica en áreas que pueden abarcar regiones mucho mayores que la cuenca de CDMX; generando vientos débiles o calma, por lo que la dispersión también se imposibilita tanto en la horizontal como para la mezcla vertical.

- La intensa y constante radiación solar que se registra en la Ciudad a lo largo de todo el año favorece la formación del ozono. Ello es resultado de las complejas reacciones que la luz ultravioleta del sol desencadena entre los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos emitidos a la atmósfera, los cuales son precursores del ozono.
- La altitud a la que se ubica la cuenca de México (2,240 msnm), determina que el contenido de oxígeno sea 23% menor que a nivel del mar (en masa), lo cual tiende a hacer los procesos de combustión más contaminantes.

Estas condiciones físico-geográficas y meteorológicas de fondo sobre la cuenca de la Ciudad son imposibles de cambiar; por ello todos los esfuerzos para mejorar la calidad del aire deben estar encaminados al control de las emisiones de precursores de ozono con la toma de medidas adecuadas y viables, tanto desde un punto de vista económico como ambiental (Informe Anual SEDEMA, 2015).

Si bien se han implementado y puesto en práctica programas y medidas como: la verificación vehicular para conocer las emisiones según el tipo de vehículo y el estado del mismo; corredores de autobuses de cero emisiones como el Metrobús,; Ecobici, un programa de préstamos de bicicletas que se volvió tan popular que hubo una lista de espera de 6 semanas; “Hoy No Circula”, que restringe el uso de los coches un día entre semana, dependiendo de su número de placas; reducción de las emisiones de NO_x y COVs, como se muestra en las estadísticas de los últimos inventarios de emisiones. Todo esto es aún insuficiente, ya que durante la temporada de ozono e incluso en otros meses del año continúan disparándose los valores de ozono en las estaciones de la cuenca.

Por ello no solo se deben tomar medidas de control y minimización, sino también de prevención. En aras a este último objetivo se trabaja fuertemente para mejorar el pronóstico de calidad del aire en la Ciudad, y mantener informada a la población en cada momento; precisamente este trabajo está encaminado a la mejor comprensión meteorológica de fondo que tiene lugar durante los episodios de altas concentraciones de dicho contaminante, y se establece como **hipótesis** que:

Los sistemas sinópticos y las variables meteorológicas modulan la fotoquímica del ozono y determinan los episodios de altas concentraciones de ozono.

Para ello se estableció como **objetivo principal** del trabajo:

Integrar las condiciones sinópticas y a mesoescala que prevalecen durante las contingencias atmosféricas por ozono troposférico en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México en el período 2003-2016.

Se trazaron además los siguientes **objetivos específicos**:

- ❖ *Reconocer los patrones sinópticos que más favorecen los episodios de alta concentración de ozono mediante el método de clúster SOM en el período 2003-2016.*
- ❖ *Interpretar los patrones sinópticos a través de las variables meteorológicas y la distribución espacial de las altas concentraciones de ozono en superficie.*
- ❖ *Valorar la corrección del pronóstico del ozono para casos de estudio en los cuales el modelo WRF subestima las concentraciones de ozono a partir de los patrones sinópticos encontrados.*
- ❖ *Proponer medidas de prevención, minimización y control para precursores de ozono.*

1.2 Justificación del trabajo

Numerosos son los estudios realizados de calidad del aire en la cuenca, todos en aras de mejorar el conocimiento sobre el fenómeno de contaminación urbana y de mejorar la calidad de vida de la población; en el caso del ozono no han sido pocos los trabajos, sobre todo enfocados en conocer la distribución espacio temporal de los precursores y del propio ozono, las principales fuentes de precursores y además la relación con las variables meteorológicas, fundamentalmente el viento local y el perfil de viento en la vertical a fin de conocer el crecimiento de la capa de mezcla durante el día y, por tanto, la mayor o menor concentración de contaminantes.

Si bien se han descrito de manera general las condiciones de escala sinóptica que favorecen las altas concentraciones de ozono; con este trabajo se pretende describir lo mejor posible las configuraciones de la escala sinóptica en diferentes niveles de la tropósfera (700 hPa, 500 hPa y 200hPa) a fin de conocer con mayor detalle cómo influyen los diferentes sistemas sinópticos sobre las variables meteorológicas en superficie, antes y durante los episodios de altas concentraciones de ozono; se profundiza en su conocimiento a través de un análisis no solo subjetivo sino también cuantitativo con el empleo de una técnica de clúster para una mayor precisión en la clasificación.

CAPÍTULO II. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO.

2.1 Variabilidad climática

El conocimiento del clima y sus variaciones en diferentes escalas de espacio y tiempo ha tenido siempre gran importancia dentro de las ciencias atmosféricas. El clima se define como el estado promedio de las variables meteorológicas en una región en un cierto periodo de tiempo, típicamente 30 años. El clima varía a lo largo de estaciones, años y décadas, a diferencia de las variaciones de un día a otro que se producen dentro del dominio del tiempo. Este estado promedio, también denominado normal climatológica, permite monitorear el clima de una región. La variabilidad climática se define entonces como variaciones de este estado medio, más allá de fenómenos meteorológicos individuales, es decir, desviaciones de las estadísticas climáticas en un periodo de tiempo (meses, estaciones, años). Por lo tanto, la variabilidad climática se mide a partir del cambio en el tiempo de esas desviaciones, las cuales se denominan anomalías.

La clasificación de tipos de circulación es un proceso que involucra la clasificación de condiciones atmosféricas en un número de estados diferentes y permite analizar la variabilidad de la circulación atmosférica en términos de los cambios en las frecuencias de estos estados (Deligiorgi et al., 2014). Estos estados atmosféricos se denominan patrones de circulación o regímenes climáticos (Weather Regimes) y se definen como estados atmosféricos recurrentes y persistentes (Polo, et al., 2011). En cuanto a recurrencia, los WR se definen como estados de la atmósfera con la más alta probabilidad de ocurrencia. En cuanto a persistencia, estos se definen como patrones de anomalías que permanecen por un periodo de tiempo, típicamente 2 días, con valores superiores o inferiores a un umbral determinado.

Los patrones de la circulación obtenidos a partir de datos diarios pueden contener información de la variabilidad del clima en diferentes escalas. Además, las variaciones interanuales en dichos patrones pueden alterar significativamente el comportamiento del tiempo a escala local, e influir en parámetros meteorológicos como la temperatura, la nubosidad y el viento. Kageyama et al. (1999) demostraron la conexión entre los patrones de circulación atmosférica y el comportamiento local del clima, por ejemplo, su influencia sobre la temperatura y la precipitación.

2.1 Meteorología sinóptica.

La escala sinóptica en Meteorología (también citada como escala grande o escala ciclónica) es una escala de longitud horizontal del orden de los 1.000 km o más y cuyos procesos tienen duración de días. En esta escala se pueden observar fenómenos como núcleos de altas y bajas presiones, frentes de cualquier tipo (cálidos, fríos, polares, ocluidos), etc. La palabra sinóptico deriva de la palabra en idioma griego *sunoptikos*, significando *vistos juntos*.

Todos esos sistemas tienen gran influencia en el estado del tiempo y afectan a la dispersión de contaminantes emitidos en la parte baja de la tropósfera en escalas de tiempo del orden de días. En este tiempo los contaminantes se distribuyen a todo lo largo de la capa límite planetaria gracias a la turbulencia y alcanzan grandes extensiones. Al mismo tiempo, los contaminantes son también depositados gracias a las nubes que traen consigo estos sistemas.

De este modo, la dependencia de la velocidad del viento, las nubes y las precipitaciones que caracteriza a cada sistema sinóptico, contribuyen más o menos a la limpieza de la atmósfera; en la medida que sean fuertes o débiles respectivamente, la velocidad del viento, y la precipitación.

Los sistemas estacionarios o semi-estacionarios de alta presión son de gran interés para estudios de dispersión de contaminantes ya que crean movimientos en la atmósfera que tienden a estancar a los contaminantes en una capa delgada cercana a la superficie. Cuando un anticiclón permanece estacionario, los contaminantes emitidos dentro de la capa de mezcla no se pueden diluir. Ante estas condiciones es probable que las concentraciones se eleven durante algunos días (Serrano, 2007). Los casos más graves de contaminación del aire en Estados Unidos se han producido o bien por un anticiclón migratorio estancado (por ejemplo, el de Nueva York en noviembre de 1966 y el de Pensilvania en octubre de 1948) o en la mitad este del anticiclón semipermanente del Pacífico (Los Ángeles) (Alonso, 2013)

Por su parte, la mesoescala, en *Meteorología*, es el estudio de sistemas del tiempo atmosférico más pequeños que la escala sinóptica meteorológica, pero más grandes que la microescala y la escala de tormenta de los sistemas de nubes cúmulos.

2.1.1 Metodologías usadas para clasificar patrones sinópticos.

La clasificación de patrones sinópticos se ha realizado fundamentalmente a través de varios métodos que pueden dividirse, en dos tipos de manera general: subjetivos y automatizados (Philippopoulos y Deligiorgi, 2012). Los métodos subjetivos, están basados en técnicas manuales de comparación y clasificación, dependen mucho de la experiencia del observador y de un análisis exhaustivo de mapas sinópticos del tiempo tanto en superficie como en diferentes niveles de altura. En presencia de un volumen pequeño de datos, estos métodos pueden ser factibles y brindar buenos resultados, pero con bases de datos muy grandes y un extenso volumen de mapas sinópticos se hace muy difícil el procesamiento y con ello una clasificación idónea.

Una de las primeras clasificaciones sinópticas manuales es la realizada por Lamb (1972) en las Islas Británicas (P. Jones et al., 1993). En la actualidad se continúa utilizando técnicas manuales para estudios de calidad del aire (Fiddes et al., 2016), la influencia de situaciones sinópticas como las bajas extratropicales en el occidente de Cuba (Fariñas y Pedroso, 2011), así como un catálogo de patrones sinópticos que afectan el archipiélago cubano (Fernández y Díaz, 2005). Estas técnicas fueron más comunes en las últimas décadas del pasado siglo debido a la poca disponibilidad de datos meteorológicos y menores avances tecnológicos, aún se siguen empleando de manera complementaria cuando se aplican técnicas más novedosas y exactas.

En las década de los 80 y 90 comenzaron a surgir los métodos automatizados, dentro de ellos pueden mencionarse los siguientes:

- Funciones Empíricas Ortogonales (Kutzbach, 1967)
- Mapas de correlación (Wallace y Gutzler, 1981)
- Funciones Empíricas Ortogonales Rotadas (Barnston y Livezey, 1987)
- Mapas Auto-Organizados (Self-Organizing Maps: SOM) (Kohonen, 1995)
- Análisis de clústeres k-means (Michelangeli et al., 1995, Sinclair et al., 2010; Markle et al., 2012; Coggins et al., 2014)

El análisis basado en correlaciones consiste en dividir en cuadrículas, tanto como sea posible la base de datos, basándose en parámetros estadísticos y suma de mínimos cuadrados, calcula un coeficiente de correlación para cada par de cuadrículas, de forma que escoge los pares con mayores correlaciones (Frakes y Yarnal, 1997). Su principal

desventaja es que no permite al observador sinóptico escoger un número posible de patrones, lo realiza automáticamente sin supervisión y, por ello muchas soluciones carecen de sentido físico. Además pueden obtenerse muchas correlaciones altas y los datos en sí puede que no presenten patrones similares debido a que una alta correlación no siempre implica causalidad física (Blair, 1998).

El análisis de Funciones Empíricas Ortogonales (FEO) es muy sencillo computacionalmente, permite una reducción eficiente de los datos y representa los patrones de mayor variabilidad de los mismos, sin embargo los patrones obtenidos pueden ser dependientes del dominio; además que la interpretación física de los mismos está limitada por la restricción de ortogonalidad en el espacio (las FEO) y en el tiempo (las Componentes Principales). Esto provoca que los patrones generados con FEO no sean tan realistas; pues los sistemas físicos no son necesariamente independientes y por tanto los modos climáticos no tienen por qué ser ortogonales (Hannachi et al., 2007). El método de Funciones Empíricas Ortogonales Rotadas flexibiliza la restricción de ortogonalidad de FEO, y permite que los patrones se puedan interpretar mejor físicamente. A pesar de las mejoras, los patrones pueden ser dependientes del dominio y el número inicial de FEO es arbitrario, por lo que también hay subjetividad en el método (NCAR Eds, 2013).

Estos últimos métodos se siguen empleando, pero generalmente dentro de algunos de los algoritmos que utilizan técnicas de conglomerados. Otros métodos menos generalizados han sido implementados a lo largo de los años y han mostrado diferentes clasificaciones sinópticas en varias regiones del planeta, por ejemplo, la clasificación de Jenkinson y Collison (1977) se basa en el establecimiento de ocho variables deducidas exclusivamente a partir de la presión atmosférica en superficie, de esta forma se establece una rejilla con una cantidad de puntos superior en una unidad, al número de variables determinadas. Con esta malla se calculan las ecuaciones para cada una de las variables y se pueden describir los mapas sinópticos más frecuentes de acuerdo a los resultados (Azorín Molina et al., 2014).

Las técnicas más avanzadas para la confección de clasificaciones sinópticas son las denominadas "técnicas de conglomerados", que reconocen patrones similares en configuraciones de mapas y en bases de datos. Los dos métodos más conocidos, basados en estas técnicas, son el método "k-means" y el método "Self-Organizing Maps" (SOM, por sus siglas en inglés).

El método “k-means” ha sido muy empleado por numerosos investigadores en los últimos tiempos (Coggins et al., 2014; Seim et al., 2017; Theobald et al., 2015, 2016; Gibson y Cullen, 2015). “K-means” permite la reasignación de diferentes objetos, en este caso patrones sinópticos, a través de un análisis continuo. Se basa en dos pasos fundamentales, el primero es un análisis de componentes principales para encontrar un número de patrones que presente una mayor varianza explicada entre la serie de datos y el segundo es la obtención de clústeres a partir de calcular un número de centroides (llamado k). Dentro del segundo paso se calcula la distancia euclidiana entre el centro de cada centroide y cada clúster hasta llegar a las configuraciones finales donde los clústeres de mayor frecuencia se obtienen por la menor distancia euclidiana con el centroide.

SOM es un método propuesto por Kohonen (2001) y permite la clasificación de datos de entrada de grandes dimensiones. Toda la base de datos se transforma en relaciones geométricas en un mapa de dos dimensiones. Posteriormente, realiza un análisis vectorial y calcula la distancia euclidiana entre cada elemento y los centroides, eligiendo así las Unidades Más Coincidentes (BMU, por sus siglas en inglés). El método ha sido utilizado en varias investigaciones en diferentes regiones del planeta y en relación con diferentes variables meteorológicas como la temperatura potencial y temperatura potencial equivalente (Nowotarski y Jensen, 2013), anomalías de presión a nivel del mar (Nigro et al., 2011), dirección y velocidad del viento (Michaelides et al., 2010), campos de humedad (Michaelides et al., 2010), altura geopotencial en diferentes niveles de presión (Philippopoulos y Deligiorgi, 2012; Jiang et al., 2012).

La ventaja que presenta el método SOM respecto al método “k-means” es que presenta una mejor aproximación a la realidad debido a que escoge las distancias más cercanas entre los principales vectores, es decir, los que presentan un mayor peso en los datos (Philippopoulos y Deligiorgi, 2012). Además, permite un orden topológico de los patrones, de forma que pueden ser diferenciados con más facilidad entre ellos. Además permite relacionar los mapas adyacentes mediante una “función de vecindad” que implementa el método y permite reconocer las diferencias entre ellos por pequeñas que sean.

Si bien SOM muestra algunas ventajas sobre otras técnicas de clasificación, su principal desventaja es que el número de conglomerados a emplear es arbitrario (Díaz-Esteban, et al., 2018), pero por consenso general es una herramienta muy útil en aplicaciones meteorológicas de diferentes escalas espaciales y temporales, por ejemplo: climatología

sinóptica, eventos de tiempo extremo, análisis de patrones de lluvia, clasificación de nubes y cambio climático (Liu y Weisberg, 2011).

2.1.2 Aplicación de las clasificaciones sinópticas en estudios de contaminación atmosférica.

La obtención de siete clústeres del flujo del viento en 900 hPa en Houston, Texas, permitió conocer la relación de estos patrones con la cantidad de días con concentraciones extremas de ozono troposférico en los meses de verano del período 2010-2014 (Souri et al., 2016). Asimismo, una clasificación sinóptica obtenida mediante el método de Kirchhofer (1974) mostró que los días con mayor concentración de ozono sobre Columbia Británica, Canadá, ocurren cuando coinciden una vaguada térmica en niveles bajos con centros de alto geopotencial en niveles altos (Mckendry, 1994).

Una aplicación de la climatología sinóptica a estudios de calidad del aire se observó en la clasificación sinóptica realizada por Heywood (1953) y ampliada por Tanner (1999) que fue utilizada para explicar los niveles de calidad del aire y concentración de gases contaminantes sobre Hong Kong, desde el punto de vista meteorológico. Los frentes fríos, vientos monzónicos del N-NE y ciclones tropicales influyeron en días con alta contaminación; mientras que masas de aire marítimas provenientes del sur influyeron en días con bajos niveles de contaminación (Tanner y Law, 2002). La proyección de escenarios climáticos futuros de emisiones de CO₂ para la región oriental de los EE. UU se estudió combinando las salidas del modelo GCM20 con una clasificación sinóptica basada en la temperatura en el nivel de 850 hPa (Lee y Sheridan, 2012). Durante el programa COST733, se desarrolló un software de clasificación sinóptica automatizada que agrupa las principales metodologías empleadas en la región europea; la cual fue utilizada para estudiar los días con altas concentraciones de ozono (Demuzere et al., 2011) y las temperaturas máximas y mínimas diarias en las estaciones europeas (Huth et al., 2008).

Cuatro patrones sinópticos obtenidos mediante datos de SLP () y viento en superficie fueron detectados por Z. Chen et al. (2008), los cuales fueron correlacionados con el Índice de Contaminación del Aire (API, por sus siglas en inglés) mostrando que este índice aumenta cuando centros de altas presiones son sucedidos por centros de bajas presiones y también durante el paso de un frente frío. Por otra parte, este índice disminuye con sistemas que presentan un fuerte gradiente anticiclónico.

La relación entre patrones sinópticos observados con la frecuencia de ocurrencia de días con eventos de contaminación atmosférica sobre la ciudad de Sydney, Australia, demostró que la presencia de anticiclones influye en el aumento de días de contingencia de moderada a alta (Leighton y Spark, 1997). Los días con alta concentración de PM₁₀ en Nueva Zelanda durante los meses de invierno fueron analizados mediante el comportamiento de patrones sinópticos usando datos de SLP, anomalías de temperatura y velocidad de viento. Se demostró que la presencia del anticiclón sobre el Mar de Tasmania junto con masas de aire frío provenientes del SO influyó en la presencia de días con altas concentraciones de PM₁₀ (Fiddes et al., 2016).

2.2 Situación de calidad del aire en grandes urbes del mundo.

La Ciudad de México, cuenta con el programa Hoy No Circula, y no es la única urbe del mundo con problemas ambientales. Según la OMS, partículas finas en el aire son responsables de alrededor de 42 mil muertes prematuras en Francia cada año. El boulevard más famoso de **París**, Campos Elíseos, en mayo de 2016 quedó fuera del alcance de los autos el primer domingo de cada mes. Desde entonces, se prohibió la circulación de vehículos a lo largo de los dos kilómetros de la avenida, el primer domingo de cada mes, cuando los museos también son gratis para el público. Esta fue una iniciativa parisina para combatir la polución, de modo que cinco nuevas rutas fueron transformadas en peatonales cada domingo y en los feriados, sumándose a las 13 ya existentes bajo el programa “París respira”,

Beijing, es una de las capitales más contaminadas del planeta, emite desde fines del 2015, una alerta de smog cuando hay mala calidad del aire. Las escuelas y jardines de infantes permanecen cerrados y se reduce a la mitad el número de autos que circulan por las calles durante varios días, es decir, disminuye en la ciudad cerca de la mitad de los autos para combatir la contaminación.

En **Nueva Delhi**, la capital de la India, también una de las ciudades más contaminadas del mundo. Durante el invierno de 2015, las micropartículas estuvieron varios días entre diez y veinte veces por encima de los límites aceptables. Ante esa situación, por primera vez se impusieron restricciones vehiculares a principios de 2016. En la segunda mitad de abril nuevamente se impusieron limitaciones y solo pudieron circular, de manera alternada, los autos con placas pares o impares.

En el año 2015, por primera vez desde 1999, se decretó emergencia ambiental en **Santiago de Chile**. El número de automóviles aumentó entre 2003 y 2013 de 925,000 a 1.7 millones y existen medidas restrictivas a la circulación. Desde principios de abril hasta finales de agosto de 2015 en la capital chilena los autos particulares estuvieron limitados a circular dos veces por semana según el número de placa; pero se excluyeron los vehículos con catalizador.

Según los expertos, cada año mueren varios miles de personas como consecuencia del smog en la capital de Rusia, **Moscú**. Para atacar el problema, desde hace años la capital rusa trata de reducir el enorme tránsito de vehículos. Se han creado zonas peatonales y ciclo vías en el centro y muchos lugares de estacionamiento dejaron de ser gratuitos.

En muchas ciudades italianas la calidad del aire es peor que en años anteriores por la falta de lluvias durante semanas. En Milán las micropartículas estuvieron durante 25 días seguidos por encima del límite. También en Roma hubo alarma por smog debido a la falta de lluvias y viento. Las autoridades emitieron prohibiciones a la circulación de autos. Sólo podían salir a la calle, alternativamente, los automóviles con placas pares o impares. En la llamada "zona verde" del centro de la ciudad sólo se permitió circular a automóviles poco contaminantes, como los híbridos.

2.3 Formación del ozono troposférico.

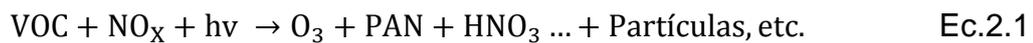
El O_3 fue descubierto por Shönbein a mediados del siglo XIX y fue este el primero en detectarlo en el aire (Committe on Tropospheric Ozone Formation and Measurement, et al, 1991).

La presencia del ozono como contaminante atmosférico en la ZMCM fue descubierta desde 1958 (Bravo et al, 1958), y el ciclo fotoquímico fue comprobado en 1978 por Bravo et al.1978.

El ozono (O_3) es un gas oxidante producido naturalmente en cantidades muy pequeñas (≈ 10 ppb). La molécula de O_3 está compuesta por tres átomos de oxígeno y se encuentra en dos capas de la atmósfera: la estratósfera (está situada entre la tropósfera y la mesosfera, puede encontrarse en las regiones polares a una altura entre 6 y 9 km o más; y en las regiones ecuatoriales entre 16 y 20 km, se extiende hasta los 50 km de altura aproximadamente) y la tropósfera (del nivel superficie hasta ~ 10 a 15 km). En la estratósfera, el O_3 es considerado como favorable, ya que protege la vida en la tierra de la radiación ultravioleta (UV) del sol. En contraste, a nivel de superficie, el O_3 es un

contaminante del aire que afecta la salud humana y los ecosistemas, y es el mayor componente del smog fotoquímico junto a los NO_x y los hidrocarburos reactivos (NMHC); constituyendo además un gas de efecto invernadero. En el hemisferio norte se triplicó la concentración de ozono en los últimos 100 años, debido a la actividad humana, de modo que se convirtió en el tercer factor más importante del efecto invernadero global después del dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄) (UNEP y OMS, 2011).

El O₃ se encuentra de manera natural en la tropósfera por la intrusión del O₃ estratosférico aunado a las reacciones fotoquímicas de precursores biogénicos y geogénicos. La concentración natural del O₃ varía con la altitud, a mayor altitud se registra una concentración mayor. Es principalmente un contaminante secundario formado por reacciones fotoquímicas de sus precursores, no es emitido directamente por ninguna fuente. El O₃ y otros oxidantes, como el peroxiacetil nitrato (PAN) y el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) se forman en áreas contaminadas por reacciones atmosféricas en las cuales se involucran dos clases de contaminantes precursores: los compuestos orgánicos volátiles (COV) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), ver la *ecuación 2.1*. El ozono se forma cuando un átomo de oxígeno, O•; generado usualmente en la tropósfera por la fotodisociación de dióxido de nitrógeno (NO₂), se combina con una molécula de oxígeno y se forma el ozono. En la figura 2.1 se representa la interacción de los hidrocarburos en el ciclo fotolítico del dióxido de nitrógeno; y la consecuente formación de ozono.



importancia fue el proyecto MILAGRO (Molina, L.T. et al., 2010), realizado en el año 2006, antecedido por la Campaña MCMA-2003 (L. T. Molina et al., 2007).

Los principales hallazgos de estos estudios, fueron sintetizados por el Molina Center for Energy and the Environment (MCE2) y están también descritos en el PROAIRE de la ZMVM 2011-2020 (MCE2, 2009); a continuación, se muestra un resumen de los aspectos más importantes relacionados con la fotoquímica del ozono.

2.4.1 Emisiones de gases precursores de ozono.

Los estudios de emisiones de precursores de ozono han confirmado que los vehículos con motor de combustión interna juegan un papel muy importante en el aporte de NO_x y de COV, precursores en la fotoquímica extremadamente activa de la ZMCM. Estos vehículos producen cantidades abundantes de partículas primarias, carbono elemental, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) adheridos a partículas, monóxido de carbono y una gran variedad de contaminantes atmosféricos tóxicos, tales como formaldehído, acetaldehído, benceno, tolueno y xilenos.

Varios estudios demostraron que las emisiones de los vehículos a gasolina en la ZMCM han disminuido en los años recientes, las de CO en particular, pero todavía los vehículos son los principales contribuyentes de emisiones en la ZMCM.

La contribución relativa de los vehículos a diésel en las emisiones de NO_x es mayor, debido en parte, a que ha existido un incremento en el consumo de diésel, así como a la introducción de tecnologías efectivas de control de las emisiones de los vehículos a gasolina.

Las fuentes de emisión tales como el comercio informal y la preparación de alimentos en la calle aún necesitan caracterizarse. Algunas investigaciones muestran que existe el potencial de impactos locales severos en la calidad del aire debido a la preparación de alimentos y a la quema de basura a cielo abierto, ya que éstos pueden ser una fuente importante de gases reactivos y partículas finas.

2.4.2 Compuestos orgánicos volátiles: fuentes y concentraciones

En el caso de los compuestos orgánicos volátiles, la evaporación de combustibles y las emisiones industriales constituyen las fuentes más importantes de COV aromáticos en la cuenca, mientras que se ha caracterizado el uso de GLP como una fuente importante de alcanos de bajo peso molecular. De hecho, ya es posible decir, que las emisiones de varios hidrocarburos son mayores en la ZMCM en comparación con las de las principales

ciudades de los Estados Unidos de Norteamérica, debido al amplio uso de GLP y a las altas emisiones industriales y evaporativas de compuestos aromáticos en la ZMCM.

En cuanto a reactividad del radical OH las especies más importantes son el formaldehído y el acetaldehído. Los aldehídos son los componentes más importantes de la reactividad en las masas de aire expeditas por la ZMVM. Estos compuestos son producidos por la oxidación de los COV en la atmósfera, y algunos también son emitidos directamente.

Por otro lado, las variaciones diurnas de las concentraciones sugieren que la formación fotoquímica de COV secundarios también es muy importante.

2.4.3 Fotoquímica urbana y regional

La fotoquímica rápida transforma la distribución de la reactividad COV/OH, de ser dominada en la ZMCM por los hidrocarburos no-metano durante la mañana, a ser dominada por COV oxigenados a cierta altura y viento abajo.

Las concentraciones medidas de radicales OH y HO₂ en la ZMCM fueron más altas que las simuladas durante la mañana cuando los NO_x son altos, lo que sugiere que posiblemente existen fuentes significativas de radicales que no se han tomado en cuenta en los modelos actuales de química de la atmósfera.

La fotólisis del ácido nitroso (HONO) y del formaldehído (HCHO) así como la ozonólisis de alquenos son fuentes importantes de radicales en la ZMCM, mientras que la fotólisis del ozono contribuye en menor medida a la producción total de radicales.

La tasa neta instantánea de producción de ozono a partir de radicales HO₂, así como la tasa observada de producción de ozono por todos los mecanismos conocidos, se encuentran dentro de las más altas observadas en otras regiones. Diversos modelos químicos de transporte y análisis de mediciones indican que la producción de ozono en la ZMCM es generalmente limitada por los COV. A escala regional, los incrementos significativos de O₃ sobre los niveles de fondo fueron observados en plumas que pudieron ser originadas en la ZMCM, con indicaciones de que la producción de O₃ ocurrió durante el tiempo de transporte de la pluma. La producción regional de O₃ parece ser sensible a NO_x así como a los COV y al CO, con la reactividad regional de radicales OH dominada por compuestos orgánicos oxigenados y CO. Se ha encontrado que la exportación de nitrógeno reactivo de la ZMVM a escala regional se lleva a cabo principalmente a través de la formación de nitratos de peroxiacetilo "PAN", los cuales pueden descomponerse

térmicamente, llevando a la regeneración de NO_x y contribuyendo a la formación regional de O_3 .

El paso de montaña hacia Tenango del Aire juega un importante papel en la calidad del aire en la ZMCM y la región. La sensibilidad de las parcelas de aire en Tenango con base en el indicador fotoquímico O_3/NO_x fue en general hacia los NO_x , indicando el paso de parcelas envejecidas típicas de ambientes rurales en las que el procesamiento de los NO_x fue prácticamente completo.

Se ha comprobado q la quema de biomasa tiene una influencia significativa en la química regional, contribuyendo a las emisiones regionales con más de la mitad del aerosol orgánico y alrededor de un tercio del benceno, nitrógeno reactivo y monóxido de carbono.

Estos resultados al igual que otros estudios hechos con anterioridad demuestran que dentro de la ZMCM es necesario reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, para alcanzar reducciones de las concentraciones ambientales de ozono (Lei et al., 2007).

Benjamin de Foy y colaboradores (B. de Foy et al., 2005) desarrollaron un modelo conceptual de los patrones de flujo meteorológico y su relación con las altas concentraciones de ozono, durante la campaña MCMA-2003. De Foy identificó tres patrones: O_3 - Sur, O_3 - Norte y Frente Frío.

Este modelo se amplió durante la campaña MILAGRO, incorporando eventos tipo Venteo - Sur, Convección - Sur y Convección - Norte (B. de Foy et al., 2008); dichos patrones se muestran en la Fig. 2.2.

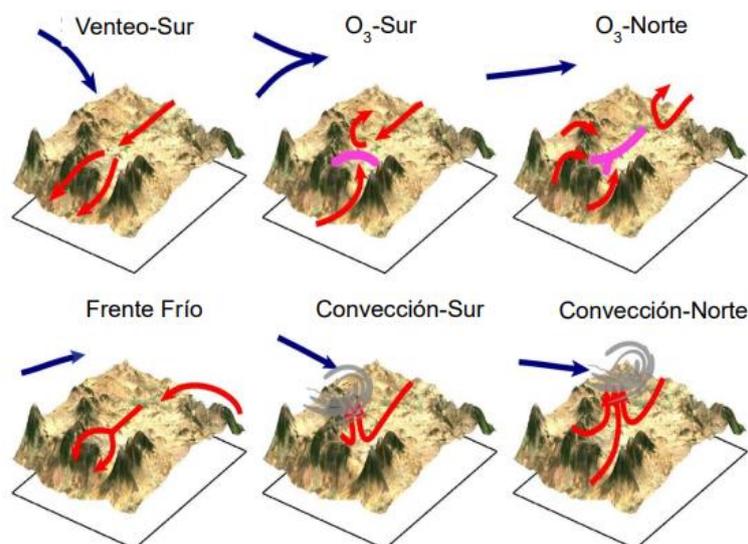


Figura 2.2 Modelo conceptual de la circulación del viento en la ZMCM.

(Fuente: B. de Foy et al., 2008)

Estos patrones tienen las siguientes características:

- a) Los eventos de frente frío se asociaron con lluvia y aire muy limpio.
- b) Eventos tipo Venteo - Sur también tuvieron fuertes vientos y condiciones limpias, pero estos se asociaron con cielos despejados.
- c) Eventos tipo O₃ - Sur presentaron tiempos de residencia más prolongados y tasas de recirculación más altas, promoviendo concentraciones elevadas de ozono en el sur de la ciudad. Estos fueron los episodios clásicos de alta contaminación estudiados antes de la Campaña Área Metropolitana de la Ciudad de México "MCMA" - 2003, por sus siglas en inglés.
- d) En contraste, días con episodios tipo O₃ - Norte presentan una mejor ventilación y el pico de ozono ocurre en el norte de la ciudad.

Además de este análisis, investigadores del CCA-UNAM han realizado una serie de campañas de monitoreo en cuencas atmosféricas vecinas a la cuenca atmosférica de la Ciudad de México y en sitios de intercambio entre cuencas (García Yee et al., 2016; Salcedo et al., 2012) con el objeto de comprender mejor el transporte entre cuencas y la calidad del aire en zonas rurales del centro de México.

Los resultados demostraron el transporte de masas de aire entre el Valle de México y los Valles de Cuernavaca-Cuautla, el Valle de Toluca y los Valles de Cuernavaca-Cuautla, y los Valles de Cuernavaca-Cuautla con la Cuenca Atmosférica de Puebla-Tlaxcala.

Las concentraciones de O₃, NO₂, NO y O_x = O₃ + NO₂, en masas de aire provenientes del estado de Morelos, observadas en Amecameca y en Tenango del Aire, sitios sobre el paso de montaña del mismo nombre, que comunica la Cuenca de México con los Valles de Cuautla y Cuernavaca. Se observa cómo las masas de aire provenientes del estado de Morelos hacia la ZMCM pueden dar lugar a elevaciones de las concentraciones de ozono en la ZMCM y, dependiendo de las condiciones sinópticas, en qué parte de la ZMCM se producen (García-Yee et al., 2016).

Bajo condiciones de baja presión atmosférica "LPS", y que corresponden al caso O₃- Norte identificado por Benjamín de Foy et al. (2008), las corrientes de viento transportan parcelas de aire limpias en precursores (NO, NO₂ y CO) desde el sur (Valle de Cuautla Cuernavaca)

y tan lejos como el Océano Pacífico. En este caso no se exceden los dos umbrales de la norma de ozono para protección de la salud, NOM-020-SSA1-2014 (SSA, 2014). En cambio, el viento más intenso produce días de Ozono-Norte en la ZMCM.

En contraste, en condiciones de alta presión atmosférica (“HPS” por sus siglas en inglés), que corresponden al caso O₃-Sur, durante la mañana el viento sopla del norte (ZMCM) y en la tarde del sur, regresando las parcelas de aire ya envejecidas fotoquímicamente y enriquecidas con emisiones del Valle Cuautla-Cuernavaca (NO₂ y CO). En este caso sí se exceden los dos umbrales de la norma de ozono incluso con viento del sur. En este caso, cuando el viento es más débil se produce un día de O₃-Sur en la ZMCM.

2.4.4 Otros estudios de calidad del aire realizados en la ZMCM

Jauregui (1988) analizó el viento superficial y la temperatura medida en la ciudad y su impacto en los niveles de SO₂. Para la estación seca, cuando las condiciones anticiclónicas y los flujos del oeste dominan, los débiles flujos septentrionales se encontraron durante la mañana, fortaleciéndose en la tarde con un mayor componente occidental y convirtiéndose en flujos de drenaje descendente durante la noche. De particular importancia fue el efecto de la isla de calor urbana que aumenta los flujos de drenaje, pero reduce el flujo ascendente hacia el oeste durante el día. El balance energético superficial fue medido por Oke et al. (1992) mostrando grandes flujos de calor de tierra capaces de modificar la circulación local. Jauregui y Luyando (1999) analizaron la contribución de la atenuación debida a los aerosoles al presupuesto de radiación. El aumento de la atenuación de la radiación se correlacionó con la reducción de las velocidades del viento y las temperaturas, pero el aumento de la humedad relativa y la contaminación del aire.

La Iniciativa de Investigación de Calidad del Aire de la Ciudad de México (MARI) llevó a cabo una campaña de campo. En febrero de 1991, en la que se utilizó un LIDAR y un avión (Streit Y Guzman, 1996). Nickerson et al. (1992) muestran algunos de los perfiles obtenidos para partículas, SO₂ y O₃, centrándose en un día con vientos débiles del norte que conducen a altos niveles de contaminantes y uno con fuertes vientos del sur que conducen a un aire más limpio.

Williams et al. (1995) modelaron los episodios para reproducir los ligeros vientos del noreste con acumulación de contaminación en el suroeste de la cuenca. El modelo de dispersión lagrangiana encontró atrapamiento de partículas transportadas hacia arriba en

los flujos de drenaje de las montañas por la noche. Bossert (1997) analizó tres episodios diferentes que él llamó flujos sinópticos, térmicos y regionales. En el primer caso, el caudal hacia el sur conduce a un fuerte flujo frío hacia el sur en la cuenca y a un rápido desprendimiento de contaminantes hacia el norte. En el segundo caso, los flujos sinópticos muy débiles conducen a una situación dominada por el calentamiento térmico en la cuenca. El flujo ascendente conduce a la ventilación de la cuenca hacia la troposfera superior. Por último, el flujo sinóptico del noroeste conduce a una situación que favorece la llegada de aire fresco y húmedo desde el Golfo de México hacia la cuenca. Esto conduce a la acumulación de contaminantes en el sur de la cuenca seguido por la ventilación de montaña como para el segundo caso.

La siguiente campaña internacional fue el experimento de capa de frontera IMADA-AVER celebrada en febrero y marzo de 1997 (Doran et al., 1998). Rápido y Zhong (1998) analizaron los factores meteorológicos asociados con concentraciones inhomogéneas de ozono utilizando modelos de mesoescala. Los flujos térmicos fueron similares a los descritos por Bossert (1997), pero con una dirección vertical del viento significativa que conduce a la recirculación sobre la cuenca y posible re-atrapamiento de los contaminantes del aire en la parte norte de la cuenca. Otros días presentaron flujos térmicos similares, pero sin cizallamiento vertical y flujos más débiles en el aire, combinados con una mayor estabilidad atmosférica que condujo a la acumulación de contaminantes en el sur de la ciudad. Los tiempos de residencia se analizaron con un modelo lagrangiano mostrando muy poca acumulación de varios días. Whiteman et al. (2000) encontraron una ausencia de inversiones nocturnas debido a los efectos urbanos. El calentamiento diurno muy intenso fue seguido por el enfriamiento rápido en la tarde que sólo podría ser explicado por la advección del aire frío del sur. Además, se describieron los flujos que no eran típicos de la cuenca, sino que se debieron a las interacciones de la meseta-cuenca.

Los flujos costeros descritos por Bossert (1997) se encontraron retenidos por las montañas y sólo condujo a un flujo de aire frío cuando el equilibrio térmico de la meseta-cuenca se invierte más tarde en el día. Doran y Zhong (2000) analizaron el fuerte flujo de brecha sur desde el valle de Cuautla a través del paso de Chalco. Esto se correlaciona tanto con el gradiente de temperatura superficial norte / sur de la cuenca como con un gradiente similar entre la cuenca y Acapulco en la costa del Pacífico hacia el sur. Jazcilevich et al. (2003) analizaron más a fondo estos episodios utilizando el modelo de química climática multiescalar (Grell et al., 2000). El transporte de CO desde el suroeste

hasta la parte norte de la ciudad como resultado del flujo de la cuenca es indicativo de la recirculación convectiva directa del aire.

El análisis de los datos de Red Automática de Monitoreo Atmosférico, RAMA) ha proporcionado valiosos conocimientos sobre la dinámica de la cuenca. Raga y Le Moynes (1996) analizaron los datos de monitoreo de toda la cuenca e identificaron un patrón de transporte desde el noroeste hacia el sureste usando análisis no lineal. Raga et al. (1999) identificó la evidencia del flujo ascendente en el borde sur de la cuenca, observando mediciones de contaminantes primarios y secundarios. Mientras que las primeras se diluyen hasta en un 50% a medida que el flujo sube la pendiente, la concentración de este último aumenta. Se encontró un tiempo de retraso de 2 h para el transporte desde el suelo de la cuenca hasta el borde de la cuenca. Por la noche, los niveles crecientes de O_3 en los sitios de la cuenca se remontan a un transporte descendente debido a los flujos de drenaje. El análisis de los componentes principales de las distribuciones de O_3 fue realizado por Klaus et al. (2001). Se encontró que cuatro autovectores representan el 55% de la varianza en las concentraciones de O_3 . Estos componentes corresponden al transporte norte / sur de los contaminantes, los flujos de pendiente este / oeste, el centro / periferia debido a los flujos de drenaje y efectos urbanos y un componente noreste / suroeste debido a los flujos de humedad y precipitación.

El análisis del comportamiento diario del ozono y de sus precursores indica que las concentraciones máximas de NO_x ocurren entre las 05:00 y las 10:00 de la mañana. Este período cotidiano coincide con el patrón de emisiones máximas diarias de fuentes móviles, velocidad del viento relativamente baja y mezcla vertical. Sin embargo, las concentraciones más bajas ocurren durante el mediodía, cuando el tráfico es ligero y la mezcla vertical es máxima (Jaimes, 2016).

En el período de 2005 a 2009, se observó que todas las estaciones ubicadas en el suroeste de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México el ozono rebasó el valor límite de la Norma Oficial Mexicana, es decir, 0.0110 ppm durante cualquier hora del año. La estación Pedregal (PED) en la parte suroeste de la ciudad registró el mayor número de horas superiores a la norma: 511, 428, 342, 291 y 287 horas durante los cinco años del 2005 al 2009, respectivamente. Esta tendencia también se observó en el promedio de 8 h (Jaimes, 2016).

Según el inventario de emisiones de 2014 en la ZMCM se emitieron a la atmósfera 138,454 T/año de NO_x y 360,123 T/año de COV durante dicho año; provenientes en su mayoría de la combustión en los 5,3 millones de vehículos y en segundo lugar de las 1935 industrias reguladas que posee la ciudad y que representan el 16% de la capacidad industrial del país. Por otro lado, están las emisiones de los 2,410 comercios y servicios regulados que también utilizan combustibles en sus negocios.

Si bien debido a las medidas implementadas para el control de la contaminación se observa una disminución de las emisiones, ver Tabla 1, aún es insuficiente el esfuerzo de las autoridades por mantener libre la ciudad de las llamadas “contingencias atmosféricas por ozono troposférico”.

Año	COV (T/año)	NO_x (T/año)
2008	591,000	188,000
2012	632,748	239,132
2014	360,123	138,454

Tabla 2.1 Emisiones de COV y NO_x de los últimos inventarios de emisiones.

CAPÍTULO III. ASPECTOS FÍSICO-GEOGRÁFICOS Y METEOROLÓGICOS DE LA ZMCM.

3.1 Área de estudio.

La ubicación geográfica de la ZMCM es motivo para que sea impactada por sistemas anticiclónicos ubicados tanto en el Golfo de México como en el océano Pacífico. Estos sistemas atmosféricos generan estabilidad atmosférica que inhibe el movimiento ascendente del aire y, por lo tanto, también inhibe la formación de nubosidad, dando lugar a que una gran cantidad de radiación solar incida sobre la superficie terrestre, haciendo que la atmósfera sea altamente fotoreactiva. De esta manera, la radiación solar constituye un primer elemento básico para que los hidrocarburos y óxidos de nitrógeno reaccionen y se lleve a cabo la formación de ozono troposférico y otros gases oxidantes.

En la época invernal, la presencia de la corriente en chorro subtropical (fuerte velocidad de los vientos del oeste en niveles altos de la troposfera) sobre la región, favorece el

transporte de humedad, y genera precipitaciones normalmente no muy importantes en las cuales la orografía juega un papel decisivo. Durante la misma época se presentan incursiones de masas de aire frío y seco, impulsadas por sistemas anticiclónicos situados en la porción centro occidental de EE.UU. o aún más al N de ese país, que penetran por la región N del territorio mexicano y avanzan hacia la zona central, llegando a extenderse sobre la ZMCM, donde provocan descensos de temperatura, algunas heladas y nevadas, así como estratificación de las capas troposféricas, induciendo la formación de inversiones térmicas en superficie o en capas atmosféricas muy bajas.

En la época de verano, identificada también como época de lluvias, se ve afectada por la entrada de aire cálido y húmedo procedente del océano Pacífico, del golfo de México y del mar Caribe. Estas características favorecen el movimiento ascendente del aire e inhiben la formación de inversiones térmicas. Esta estación del año también propicia un incremento de la humedad debido al patrón de viento propio de la temporada (los Alisios), sino también a la constante presencia de perturbaciones atmosféricas conocidas como ondas tropicales que propician grandes cantidades de precipitación sobre los lugares por los cuales se desplazan.

3.2 Influencia de las variables y procesos meteorológicos en la contaminación atmosférica.

3.2.1 Islas de calor

Las áreas urbanas producen calor, generado por las actividades humanas, así como por los materiales de construcción como el ladrillo, el asfalto y el cemento que absorben y retienen el calor de manera más eficiente que el suelo y la vegetación. Las construcciones propias de la ciudad frenan los vientos ligeros. Las ciudades suelen tener varios grados más de temperatura que en su periferia, por eso se les llama isla de calor. Esta diferencia de temperatura favorece la formación de una circulación determinada por la ascendencia del aire caliente urbano, este es sustituido por aire de la periferia; al enfriarse el aire urbano que ascendió, desciende por la periferia de la ciudad, el cual volverá al centro urbano cerrando el ciclo. Según López (2006) y Alonso (2013), una de las características del viento que determina la dilución de los contaminantes en la atmósfera sobre áreas urbanas, es la rapidez promedio del viento en la capa de mezcla, debido a que esta varía con la altura.

Cuesta, 2000 describe los principales factores que influyen sobre el carácter de la variación de los perfiles de la rapidez del viento:

1. La influencia de la superficie de la tierra sobre el flujo de aire (rugosidad del terreno).
2. El gradiente del viento.
3. La fuerza de desviación del viento por el movimiento de rotación de la tierra.
4. El intercambio turbulento en la atmósfera.

En la periferia de las ciudades donde suele haber industrias contaminantes, producto a las condiciones imperantes no resulta fácil la dilución de los contaminantes, lo cual, en ausencia de vientos fuertes y lluvias la dispersión de los contaminantes es compleja, ya que el carácter cíclico de los vientos dificulta su dispersión, esto produce lo que se conoce como cúpula de contaminantes que rodea la ciudad.

3.2.2 Papel de la estabilidad atmosférica en la dispersión de los contaminantes atmosféricos.

En los estudios sobre calidad del aire, el cálculo de la estabilidad atmosférica se incluye como elemento preponderante entre las determinaciones meteorológicas (Alonso, 2013). La atmósfera puede ser considerada como un sistema termodinámico en el que cualquier desplazamiento vertical estará sometido a un proceso adiabático. Al ascender las partículas de aire disminuye la presión y se enfrían al dilatarse; al descender la presión aumenta y la compresión hace que la temperatura aumente. La estabilidad de la atmósfera se clasifica en tres clases principales (estable, neutral e inestable). Según las notas de Marcos. B, (2000), las condiciones de estabilidad dependerán de los cambios de temperatura al subir en la vertical.

Las condiciones de estabilidad se observan fundamentalmente durante la noche y el inicio de la mañana donde la turbulencia es limitada, el flujo es cuasi laminar y las emisiones se dispersan poco y lentamente. Consideraremos que el aire es estable cuando la disminución de temperatura con la altura es menor que el gradiente adiabático húmedo. Estas características de la atmósfera generan serios problemas, sobre todo desde las fuentes con chimeneas de poca altura en relación con los edificios cercanos o la topografía del terreno. Un ejemplo de cómo se manifiesta la estabilidad atmosférica es el fenómeno de la inversión térmica, el cual se produce cuando el aire más caliente está por encima del aire frío, lo cual inhibe la mezcla vertical. Este fenómeno produce una fuerte acción desfavorable en la dispersión de contaminantes. Las condiciones inestables ocurren

fundamentalmente cuando la temperatura disminuye con la altura a más de 1°C/km, por lo que los movimientos verticales son acelerados y el mezclado es abundante. Al describir la inestabilidad atmosférica analizaríamos el comportamiento de una columna de aire. Cuando el aire de la capa inferior, de esta columna, es más cálido y menos denso que el de arriba, el aire se eleva y desplaza al aire de capas más altas.

Las condiciones más inestables se producen con calentamiento intenso de la superficie. Debido a esto, las emisiones se difunden rápidamente con la ocurrencia de elevadas concentraciones instantáneas en superficie. Para el caso de la estratificación neutral, que ocurre cuando coincide la variación de temperatura del estrato con el gradiente vertical adiabático. En estas condiciones la dispersión vertical de contaminantes no está limitada. Las condiciones más estables se producen en épocas de bajas temperaturas, en días fríos con inversiones térmicas.

3.2.3 Papel de la capa de mezcla en la dispersión de los contaminantes.

En la literatura de la contaminación ambiental, la capa de mezcla es considerada como el estrato de aire a través del cual los contaminantes liberados desde la superficie terrestre son transportados y difundidos a través de la atmósfera (Arya, 1988), ya sea en la componente horizontal como en la vertical por el efecto de mezcla. De esta forma, las emisiones que tienen lugar en las capas bajas quedan retenidas en un volumen de aire cuya dimensión vertical está delimitada por la altura de la capa de mezcla. Por lo que se dice que existe una estrecha relación entre las concentraciones de los contaminantes y el espesor de este estrato del aire.

El procedimiento estándar para determinar su espesor es examinar el perfil de temperatura potencial, la temperatura a la cual el aire estaría si se mantuviera la misma presión encontrada en la superficie. Las velocidades del viento no serán constantes a través de la capa de mezcla atmosférica. La dispersión de los contaminantes emitidos depende de la cantidad de turbulencia en la capa de mezcla. La turbulencia se puede crear por el movimiento horizontal y vertical de la atmósfera. Cuando el transporte de los contaminantes se da con la misma velocidad y en la misma dirección que el viento que los transporta, se produce un transporte por advección. Por lo general, una mayor velocidad del viento reduce las concentraciones de los contaminantes al nivel del suelo, ya que facilita su dilución (INECC, 2016 a).

Al transporte y la dispersión de los contaminantes por efecto del movimiento vertical de la atmósfera se le conoce como transporte por difusión, y puede ser de tipo molecular o turbulento. El transporte turbulento se debe básicamente a la existencia de remolinos en el aire, que se producen por irregularidades en el terreno (turbulencia mecánica) o por diferencias de temperatura entre las capas atmosféricas (turbulencia térmica).

Estos procesos contribuyen al movimiento vertical de las masas de aire y definen las condiciones de estabilidad atmosférica (INECC, 2016 b).

3.2.4 Relación de la dispersión de contaminantes y los sistemas de la escala sinóptica.

La escala ***sinóptica*** es la escala meteorológica que describe los fenómenos definidos por un rango espacial de cientos a miles de kilómetros y cuyos procesos tienen una duración de días. En esta escala se pueden observar fenómenos como núcleos de altas y bajas presiones, frentes de cualquier tipo (cálidos, fríos, polares, ocluidos), etc. En varios estudios se ha abundado acerca de la influencia de los patrones meteorológicos de gran escala en la frecuencia y distribución de las concentraciones de sulfatos en la costa este de los Estados Unidos. Cambios temporales en la circulación a gran escala, por la gran influencia de los patrones sinópticos en las condiciones de calidad atmosférica deben tenerse en cuenta en la planificación de las actividades económicas.

Los sistemas sinópticos son las grandes masas de aire más o menos homogéneas que al permanecer semiestacionarias sobre diferentes regiones adquieren características propias.

Todos esos sistemas tienen gran influencia en el estado del tiempo y afectan a la dispersión de contaminantes emitidos en la parte baja de la tropósfera en escalas de tiempo del orden de días. En este tiempo los contaminantes se distribuyen a todo lo largo de la capa límite planetaria gracias a la turbulencia y alcanzan grandes extensiones. Al mismo tiempo, los contaminantes son también depositados gracias a las nubes que traen consigo estos sistemas. Así estos sistemas, con vientos fuertes, nubosidad y precipitaciones contribuyen más a la limpieza de la atmósfera.

Los sistemas estacionarios o semi-estacionarios de alta presión son de gran interés para estudios de dispersión de contaminantes ya que crean movimientos en la atmósfera que tienden a estancar a los contaminantes en una capa delgada cercana a la superficie.

Cuando un anticiclón permanece estacionario, los contaminantes emitidos dentro de la capa de mezcla no se pueden diluir. Ante estas condiciones es probable que las concentraciones se eleven durante algunos días (Serrano, 2007). Los casos más graves de contaminación del aire en Estados Unidos se han producido o bien por un anticiclón migratorio estancado (por ejemplo, el de Nueva York en noviembre de 1966 y el de Pensilvania en octubre de 1948) o en el límite este del anticiclón semipermanente del Pacífico (Los Ángeles) (Alonso, 2013).

3.2.5 Papel del viento en la dispersión de los contaminantes atmosféricos

El viento desempeña un papel primordial en el tema de contaminación atmosférica. Constituye uno de los componentes principales del clima y se caracteriza vectorialmente por la magnitud de su rapidez (velocidad) y la dirección de donde sopla. El viento es uno de los principales agentes de transporte de sustancias nocivas, de ahí que para realizar estudios de contaminación del aire se necesita estudiar su comportamiento del modo más explícito posible.

La velocidad del viento estará determinada por los gradientes de temperatura. El viento tendrá mayor velocidad cuando los gradientes de temperatura aumentan. De igual manera aumenta con la altitud como consecuencia de la disminución de la influencia del rozamiento contra el suelo. El viento, al transportar los contaminantes, produce su dispersión horizontal y determina la zona expuesta. Por lo general, una mayor velocidad del viento reducirá las concentraciones de contaminantes al nivel del suelo, produciéndose una mayor dilución y mezcla. Como un comportamiento particular del viento pueden producirse circulaciones cerradas, en las que los contaminantes lanzados a la atmósfera se incorporan a la circulación del viento y ocasionalmente se produce un aumento y acumulación progresiva de contaminantes en lugares o zonas barridas por esta variable. El hecho de que la Ciudad de Campeche se caracterice por un ambiente urbano y marítimo, hace que la dispersión de los contaminantes se vea afectado por situaciones meteorológicas como la presencia de las islas de calor y las brisas marinas.

- **Vientos y brisas**

La diferencia entre el viento y la brisa no está en su intensidad, sino en su origen. El viento es de origen meteorológico, es consecuencia del desplazamiento del aire de las zonas donde la presión es alta (anticiclones) a las zonas donde la presión es baja (borrascas). Este desplazamiento del aire no se hace en línea recta del centro de la alta presión al

centro de la baja presión, sino que sufre una importante desviación hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur, debido al efecto de Coriolis. Los vientos de origen meteorológico son los que nos anuncian en las predicciones, y es muy probable que acierten. En zonas de montaña, no obstante, el viento meteorológico suele verse influenciado por el relieve, de manera que a veces cambia de dirección al meterse por los valles y se puede acelerar enormemente en zonas estrechas. Otras veces podemos encontrarnos con zonas de calma dentro de los valles mientras en altura, por encima de las montañas, el viento es muy fuerte. Las brisas, por el contrario, son de origen local y se generan en el sitio. Hay varios tipos de brisa: en montaña se producen las brisas de ladera y las de valle, en la costa se producen las brisas marinas.

- **Brisas de ladera**

Los días soleados, desde primeras horas de la mañana, el sol ilumina las partes altas de las laderas orientadas al este. A medida que avanza la mañana, la radiación solar va calentando estas laderas. No todos los terrenos absorben la radiación solar con la misma facilidad, y por eso hay suelos que se calientan más que otros. Los terrenos de roca, tierra o vegetación seca suelen calentarse antes que los terrenos cubiertos de bosque o vegetación verde. Pero hay que tener en cuenta que el sol calienta con rapidez las laderas bien orientadas hacia él, sin embargo, el sol no calienta la masa de aire, por muy expuesta que esté a su radiación. Sin embargo, el aire sí que tiene la propiedad de calentarse cuando está en contacto con una superficie caliente (igual que el aire se calienta en contacto con un radiador de calefacción). Nos encontramos entonces, que a medida que avanza la mañana de un día soleado, las laderas orientadas al Este, se calientan por el sol, y éstas a su vez, calientan la capa de aire, de un metro o dos metros de espesor, que está en contacto con ellas. Esa capa de aire ligeramente más caliente, tiene menos densidad, pesa menos, y lo que hace es deslizarse por la ladera hacia arriba, creando la llamada brisa de ladera. Estas brisas ascendentes se producen por las mañanas en las laderas orientadas al Este. Durante las horas centrales del día en las laderas orientadas al Sur. Y por la tarde en las orientadas al Oeste; mientras que las que están orientadas al Norte, prácticamente nunca crean brisas de ladera.

Las brisas de ladera son corrientes de aire que se producen a poca distancia de la ladera, lo que, si ocurre con frecuencia, es que estas corrientes de aire ascendente, al llegar a la cima de la ladera, se desprende de está y forma una de las típicas térmicas de montaña,

en forma de columna de aire ascendente, que continúa ascendiendo hasta que su temperatura se equilibra con la del aire que le rodea.

- **Brisas de Valle.**

Las brisas de valle son una consecuencia de las brisas de ladera. Cuando la mañana ya está bien avanzada y nos acercamos a medio día, nos encontramos con que todas las laderas orientadas al este están produciendo una fuerte brisa de ladera que mueve millones de metros cúbicos de aire hacia arriba. Las laderas orientadas al sur empiezan también a producir sus propias brisas de ladera. Ocurre entonces, que el fondo de los valles de montaña, sobre todo las partes altas, donde las laderas son más largas y abruptas, se está quedando sin aire puesto que la demanda de aire de las brisas de ladera es enorme. Para rellenar este "vacío", se genera la brisa de valle, que no es más que una fuerte corriente de aire que sube por el valle, para alimentar a las voraces brisas de ladera.

La brisa de valle se produce en el fondo de los valles y afecta solo a los 200 ó 300 primeros metros de altura. Suele comenzar al final de la mañana, tiene su máxima intensidad sobre las tres o las cuatro de la tarde y se termina al final de la tarde, cuando las laderas ya no producen brisa ascendente, sino todo lo contrario, un excedente de aire frío y pesado que se desliza ladera abajo y acaba por producir unas suaves brisas de valle descendentes (catabáticas) que a veces perduran hasta la mañana siguiente.

No todos los días tiene la misma intensidad ni los mismos "horarios". La insolación y sobre todo la estabilidad o inestabilidad atmosférica, son quienes van a definir la intensidad de las brisas de montaña, que además pueden verse afectadas por los vientos meteorológicos. Con tantas variables en juego es prácticamente imposible hacer una predicción exacta de cómo serán las condiciones para un día y una hora determinados. El hecho de llamarla "brisa" no quiere decir que su intensidad no pueda ser fuerte. En los valles de alta montaña, sobre todo si son largos y rectos, con grandes laderas a los lados, las brisas de valle suelen ser muy fuertes en primavera y verano, llegando frecuentemente a los 40 o 50 km/h.

CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

4.1 Área de estudio

La región geográfica escogida para estudiar el comportamiento de los patrones sinópticos que influyen sobre la ZMCM se localiza entre los 0-70° N y los 10- 150° W (ver Fig.4.1). Esta malla abarca el Mar Caribe, América Central, el Océano Atlántico Norte y el Océano Pacífico Norte Oriental. Se escogió dicha región de modo que no solo permita analizar el desplazamiento de sistemas como son los anticiclones de origen continental migratorio, los sistemas frontales o las ondas tropicales, sino también los principales centros de acción de la circulación general de la atmósfera a gran escala que influyen sobre México y sus mares adyacentes; dígase el Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte y el Anticiclón del Pacífico Norte.

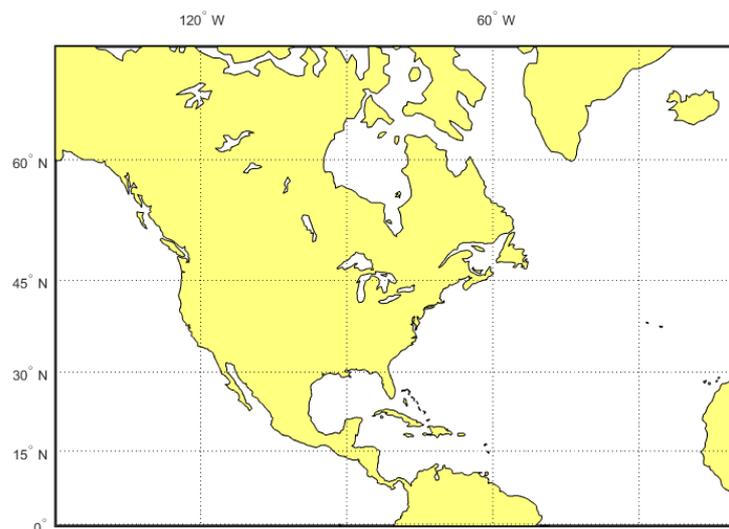


Figura 4.1 Región de estudio para realizar el análisis sinóptico y su influencia sobre la ZMCM.

(Elaboración propia)

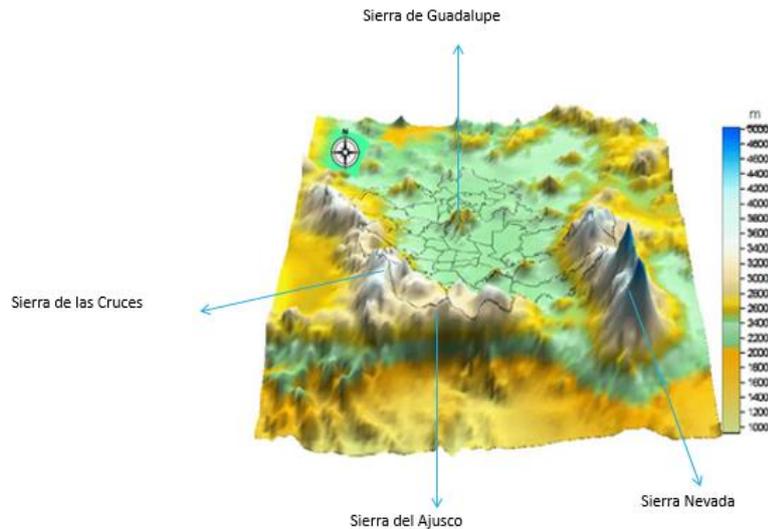


Figura 4.2 Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

(Fuente: <http://www.sma.df.gob.mx>. Modificada por Moreno Torres. E (2017)).

El análisis de las variables meteorológicas, así como de los patrones encontrados en el presente estudio fue descrito para la ZMCM, debido a la gran influencia de la meteorología, como ya se fundamentó en los capítulos anteriores para los estudios de calidad del aire en la región y en específico en los episodios de altas concentraciones de ozono.

La ZMCM se caracteriza por ser una gran urbe de aproximadamente 21 millones de habitantes. Concretamente el centro de la metrópoli está en la latitud 19° 30' N y en la longitud 99° 02' W, a una altura de 2240 m sobre el nivel medio del mar. En su relieve sobresalen algunas elevaciones como la Sierra de Guadalupe en el N; el cerro de la estrella en el centro; la Sierra Nevada en el sureste; la región conocida como la sierra del Ajusco en el Sur y Suroeste; la Sierra de las Cruces en el occidente. Las elevaciones topográficas más significativas se localizan al oriente de la cuenca, como son el Volcán Popocatepetl, que cuenta con 5465 m y el Iztaccíhuatl con 5230 m. La ZMCM cuenta con una superficie total de 4715,3 km².

4.2 Datos de reanálisis de ERA Interim

Para la realización de la presente investigación, en este caso para el análisis SOM, se utilizaron los datos de reanálisis de ERA Interim (Dee et al., 2011) obtenidos del Centro Europeo de Pronóstico del Tiempo a Mediano Plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés).

Los datos de ERA Interim son datos de reanálisis de la atmósfera global con buena resolución espacial y temporal que están disponibles desde 1979 hasta el presente. La

información meteorológica se puede obtener en los horarios sinópticos, 0000 UTC, 0600 UTC, 1200 UTC y 1800 UTC; además de 28 intervalos tri-horarios para el pronóstico del tiempo. Los datos se presentan en 61 niveles verticales, que abarca desde el nivel 1 con valores de presión atmosférica de 0.1 hPa en los 64.56 km de altura hasta el nivel 61 que es la superficie terrestre. Además de los 61 niveles verticales que posee el reanálisis, se pueden obtener 37 niveles de altura significativos de acuerdo a la altura sobre el nivel medio de mar y los valores de altura geopotencial. De esta forma, el nivel de 500 hPa corresponde al nivel 39 de los 60 verticales y a una altura de 4.94 km; el nivel de 700 hPa corresponde al nivel 44 de los 60 niveles verticales y a una altura de 2.67 km; el nivel de superficie se considera con el valor de presión atmosférica de 1013.25 hPa y corresponde al nivel 61 de los 61 verticales.

En este trabajo se emplearon las variables altura de geopotencial (geopotencial height, gH) para los niveles de presión de 700 y 500 hPa para las 1800 UTC (1200 o 1300 UTC locales en la región central de México, en dependencia de si se usa o no el horario de verano), en este caso solo se emplearon los datos de los días que sobrepasaron las 154ppb, valor que se corresponde con la activación de la Fase I de contingencia atmosférica (ver Tabla 4.1), en este caso solo para los meses comprendidos entre febrero y junio (temporada de ozono) y los años 2003-2016.

Contaminante	Fase de Precontingencia	Fase I	Fase combinada	Fase II	Suspensión
Ozono	Derogado	>150 >154 ppb	Derogado	>200 >204 ppb	≤150 ≤154

*Tabla 4.1 Fases vigentes del PCAA para ozono, expresadas en unidades del índice Metropolitano de Calidad del Aire y en unidades de concentración.
Fuente: (Informes Anuales de Calidad del Aire, 2017, SEDEMA).*

Los datos se tomaron de la base de datos de ERA Interim en formato NetCDF (Network Common Data Form), el cual permite el manejo de los mismos en forma de arreglos matriciales y poseen una resolución espacial de aproximadamente 79 km, que serían 0.703125° en coordenadas geográficas.

El análisis se realizó para un total de 308 días en los que se superó dicho valor en el período según la red de estaciones del Sistema de Monitoreo Atmosférico. De esta forma fue presentado al algoritmo SOM para la detección de patrones sinópticos, una matriz de

308 x 20301 (309 x 201 x 101; días x longitud x latitud) valores para cada una de las variables.

4.3 Herramientas empleadas en el análisis sinóptico.

Para el análisis de los patrones sinópticos encontrados y su influencia sobre el área de estudio, se emplearon además los mapas de flujo en los diferentes niveles de la tropósfera (ver Fig. 4.3) que se pueden recrear en la página: <https://earth.nullschool.net>; con la ayuda de *EARTH*, que es una página interactiva que construye una visualización casi en tiempo real de las condiciones climáticas globales pronosticadas, cuya base de dato se nutre del modelo Global Forecast Systems (GFS) para modelar las condiciones atmosféricas y además del paquete de más de 20 sistemas de predicción numérica que comprende la producción operacional del National Centers for Environmental Prediction (NCEP, por sus siglas en inglés); además del pronóstico, también es posible obtener los reanálisis del GFS. Esta última herramienta fue la empleada por esta investigación, por la posibilidad de localizar con mayor facilidad los sistemas sinópticos.

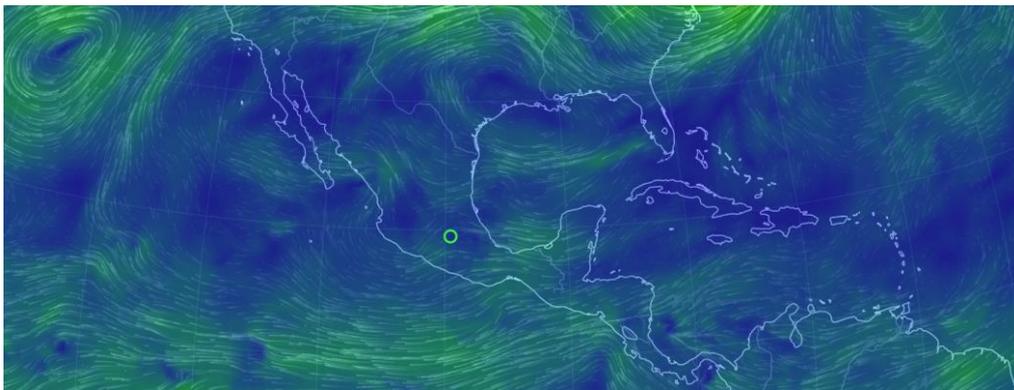


Figura 4.3 Mapa de flujo obtenido de EARTH

(Fuente: <https://earth.nullschool.net>)

Además, fueron empleados los mapas sinópticos de superficie y de altura de geopotencial de los niveles de 200, 500, 700 y 850 hPa; generados por el Centro de Pronósticos del Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET). Estos mapas (Fig. 4.4) abarcan la región de estudio y ya presentan el análisis sinóptico de los sistemas meteorológicos a dicha escala (dígase centros ciclónicos, anticiclónicos, ondas tropicales) que se observan e influyen sobre el territorio mexicano. Los mismos se encuentran disponibles desde el año 2003 en formato digital.

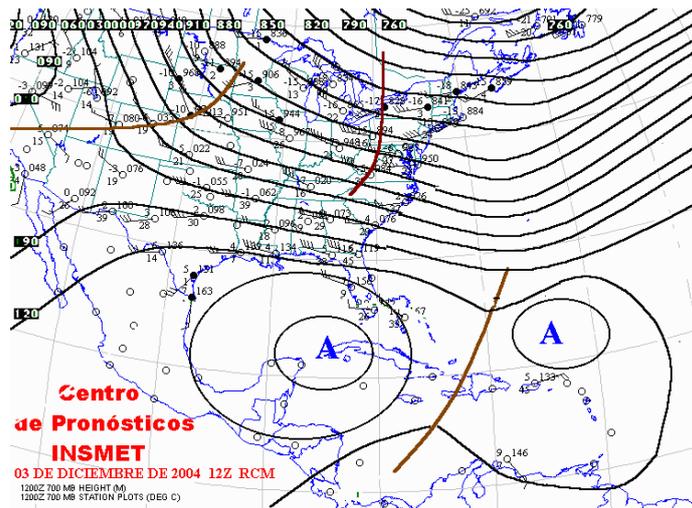


Figura 4.4 Mapa sinóptico del Centro de Pronóstico del INSMET.

(Fuente: INSMET, Cuba.)

4.4 Diagramas termodinámicos.

Se utilizó como herramienta fundamental el estudio de los diagramas termodinámicos correspondientes a los días en que se rebasó la norma. En este caso se analizó el horario de las 12 UTC del día del evento (6:00 am hora local o 7:00 am para el horario de verano), para conocer si habían capas de estabilidad o de inversión en la tropósfera baja o media; fenómeno que pudo generar estancamiento de contaminantes y lento crecimiento de la capa de mezcla.

Hay varios diagramas para representar el estado de la atmósfera. Los más utilizados son dos: El tefigrama y el diagrama de Stüve, este último fue el empleado en la presente investigación. Entre otros usos, el diagrama de Stüve se utiliza para determinar la energía de la atmósfera y su estabilidad; la formación de nubes convectivas o de desarrollo vertical, el paso de frentes y la aparición de engelamiento y de turbulencias.

Desde la siguiente dirección: <http://weather.uwyo.edu/> de la Universidad de Wyoming, en el apartado “Upper air observations”, es posible consultar los sondeos de varios años de todo el mundo y además se pueden transformar en diagramas de diversos tipos o ver los datos crudos del radiosondeo.

En este caso se emplearon los radiosondeos del Aeropuerto Internacional Benito Juárez; en la Fig. 4.5 se muestra un ejemplo de los mismos.

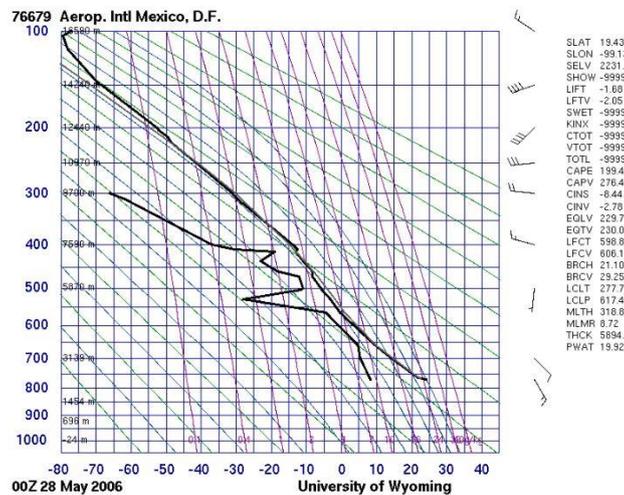


Figura 4.5 Diagrama de Stüve del sondeo.

(Fuente: <http://weather.uwyo.edu/>)

Las líneas azules horizontales son niveles de presión-altitud y las verticales ofrecen los intervalos de temperatura. La curva negra gruesa de la derecha indica la distribución vertical de temperaturas y la de la izquierda el punto de rocío. La diferencia entre la temperatura y el punto de rocío ofrece una medida de la humedad relativa.

4.5 Método "SOM" para la obtención de patrones sinópticos.

El método utilizado para la detección de patrones sinópticos fue el método conocido como Self-Organizing Maps (SOM, por sus siglas en inglés). El método SOM fue sugerido por Kohonen y Maps (1995). En el algoritmo, los nodos que inicialmente se presentan como datos multidimensionales se proyectan en una malla bidimensional regular. Dicha malla está compuesta por nodos, cada una de las cuales está representada por un vector de peso $m = [m_1, m_2, \dots, m_d]$, donde d es la dimensión de los vectores de entrada.

Es decir, los vectores de peso tienen la misma dimensión que los vectores de entrada. Los nodos están conectados a sus adyacentes mediante una relación de vecindad, lo cual permite un enfoque topológico en la selección de los clústeres.

Dentro del método se realizan una serie de procedimientos estadístico-matemáticos como son el reconocimiento de centroides para la confección de los conglomerados y la obtención de Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs, por sus siglas en inglés) para

reconocer los patrones más frecuentes de acuerdo al porcentaje de varianza explicada (Kohonen, 2001).

En el presente estudio, se empleó la paquetería SOM Toolbox, en el lenguaje de programación MATLAB para la obtención de los patrones sinópticos sobre la región ya referida. Las dimensiones del arreglo matricial fueron de 308 x (101x201) que representa el número de días analizados en todos los puntos de la rejilla seleccionada como región de estudio. Este arreglo fue transformado a una matriz bidimensional de 308 x 20301, debido a las exigencias del método, de modo que cada fila corresponde a cada uno de los días con situación de contingencia atmosférica por ozono troposférico en el período 2003-2016 y a los meses desde febrero a junio; cada columna representa los puntos de rejilla para el área de estudio. Se construyó una matriz con las características mencionadas anteriormente para la variable objeto de estudio.

4.5.1 Pasos para el desarrollo del método SOM.

Primer paso: inicializar los vectores de peso de los nodos de la malla bidimensional creada con la función “*som data struct*”. Esta inicialización se realiza mediante las funciones “*som lininit*” o “*som randinit*”. El parámetro *randinit* indica que los vectores de peso serán determinados de forma aleatoria, organizando los valores desde el mínimo hasta el máximo, aunque provengan de forma desorganizada. Por su parte, el parámetro *lininit* indica que los vectores de peso serán seleccionados de acuerdo a un subespacio lineal creado con los eigenvectores principales de la matriz de covarianza de los datos de entrada. En este caso se escogió el parámetro *lininit* debido a que la bibliografía consultaba arriba a la conclusión de que es más eficiente que el parámetro *randinit*, pues realiza un Análisis de Componentes Principales para determinar cuáles vectores tienen un mayor peso en la varianza de los datos, por lo que lo hace más adecuado a la hora de la interpretación física de los resultados.

Segundo paso: proceso iterativo en el cual, en cada paso de tiempo cada vector x de los datos de entrada se hace corresponder con un nodo de la malla a partir de una medida de distancia, en este caso la Distancia Euclideana. El nodo cuyo vector de peso resulte más cercano o similar al vector x , se denomina Mejor Unidad Coincidente (BMU, por sus siglas en inglés) o neurona “ganadora”, denotada por c :

$$C = \min\{\|\vec{x}(t) - \vec{m}_i(t)\|\} \quad \text{Ec.4.1}$$

Donde, $\| \cdot \|$ representa la medida de distancia Euclídeana, i es el índice del nodo de la malla ($i = 1, 2, \dots, n$) y t representa el paso de tiempo.

Después de encontrar cada BMU (ver Figura 4.6), se identifica cada uno de los vectores de peso con las BMUs y se pueden reconocer cuáles pertenecen a cada día del periodo de estudio. Para efectuar este paso se debe seleccionar entre dos parámetros batch o por lotes y el secuencial. El parámetro secuencial realiza la búsqueda de las BMUs considerando cada uno de los vectores dentro de un radio de vecindad asignado; mientras que el parámetro batch agrupa los vectores en pequeños lotes o paquetes, de modo que las BMUs son determinadas por el peso promedio de los vectores.

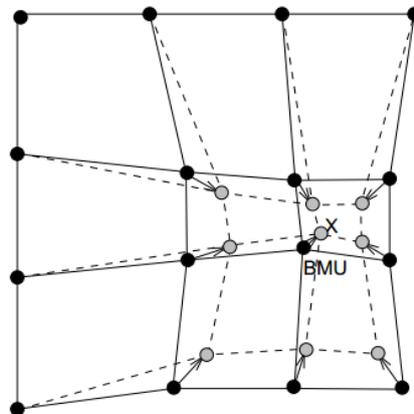


Figura 4.6 Actualización de la Mejor Unidad de Coincidencia (BMU) y sus vecinos hacia la entrada simple marcada con X. Las líneas continuas y punteadas corresponden a la situación antes y después de la actualización, respectivamente.

La selección de estos parámetros no produce cambios notables en los resultados del algoritmo, aunque el parámetro batch permite una mejor optimización del tiempo de corrida del algoritmo, por lo que fue seleccionado para la implementación del método SOM en este trabajo.

Con el parámetro batch o por lotes, en lugar de usar un sólo vector en cada instante de tiempo (iteración), el conjunto de datos de entrada es particionado en subconjuntos de Voronoi, haciéndose corresponder cada uno de estos subconjuntos a cada uno de los nodos del SOM. El nuevo vector de peso del nodo i es una media ponderada de este subconjunto de vectores de entrada y se actualiza mediante la siguiente regla:

$$\vec{m}_i(t + 1) = \frac{\sum_{j=1}^n h_{ic}(t) \vec{x}_j}{\sum_{j=1}^n h_{ic}(t)} \quad \text{Ec.4.2}$$

Donde $h_{ic}(t)$ es el núcleo de vecindad alrededor del nodo c en el tiempo t ; $h_{ic}(t)$ es una función decreciente del tiempo y de la distancia d_{ic} (Ecuación 4.3) entre el nodo i y el “ganador”, c . Dicha función define la región de influencia que el espacio de entrada tiene en el SOM.

$$d_{ic} = \|\vec{r}_c - \vec{r}_i\| \quad \text{Ec.4.3}$$

La función de vecindad en el algoritmo SOM se refiere al conjunto de nodos vecinos que son afectados por el nodo ganador en la fase de entrenamiento. A medida que el número de iteraciones avanza en el entrenamiento, la vecindad, se hace más pequeña hasta afectar solamente al nodo ganador, de modo que el radio de vecindad tiende a cero en la última iteración. De esta forma, las neuronas se van ordenando, siendo las más cercanas con características similares. Esta función de vecindad posibilita un enfoque topológico en la visualización de los patrones sinópticos obtenidos en el algoritmo, y se puede ver una sucesión lógica del comportamiento de las variables cuando son representadas. Existen distintas funciones de vecindad que pueden usarse en el algoritmo, estas son: “bubble”, “gaussian”, “cutgauss” y “ep”. En este trabajo es utilizada la función “cutgauss” o pseudogaussiana.

Esta función de vecindad es la principal ventaja del método SOM frente a otros métodos como EOFs, k-means, aproximación jerárquica, etc. En el caso de k-means sólo es actualizado el vector de mejor coincidencia (BMU) y no sus vecinos topológicos en el mapa.

De modo general la elección de los parámetros para desarrollar este algoritmo se realizó de manera experimental y siendo consecuente con la bibliografía consultada para la región de estudio y los objetivos trazados, ya que no existen resultados analíticos que garanticen la selección óptima de los mismos. El más importante de estos parámetros es el número de neuronas, nodos o mapas auto-organizados, que se elige en dependencia del número de regímenes o patrones que se espera obtener.

Un número grande de neuronas genera una resolución más detallada en los patrones representativos, dado que el error de cuantificación se reduce a medida que aumenta el número de SOM (Johnson et al., 2008); además una menor incertidumbre de que queden agrupados todos los posibles “casos” o patrones atmosféricos contenidos en los datos de entrada. Ahora bien, un número demasiado grande de SOM, hace engorrosa la

interpretación y el análisis de los patrones puede tornarse más difícil y por supuesto, aumenta el costo computacional.

Para escoger el número de mapas auto-organizados se realizaron varias pruebas modificando el tamaño del arreglo matricial de SOM (2×2 ; 2×3 ; 3×3), decidiendo finalmente tomar un arreglo de 2×3 SOM, que representa un balance adecuado entre el tiempo de cómputo y la representatividad de los principales patrones sinópticos.

Díaz-Esteban y Raga (2018) mostraron 16 regímenes de tiempo y su influencia en la precipitación para la región central y sur de México en los meses de verano, realizando un previo análisis de EOFs del comportamiento de las variables utilizadas para una selección óptima del número de conglomerados. Sáenz y Durán-Quesada (2015) detectaron 11 patrones del comportamiento del viento en la región de América Central basándose en el "Índice de Clasificación" presentado por Michelangeli et al. (1995) y la revisión bibliográfica de otros trabajos centrados en el periodo invernal. Otros autores de diferentes regiones del planeta basaron su elección del número de conglomerados en métodos subjetivos en combinación con objetivos, probando con diferentes números hasta observar un mejor significado físico en los resultados del algoritmo (Alexander et al., 2010; E. N. Cassano et al., 2015; Hewitson y Crane, 2002; Michaelides et al., 2010). Cala, 2018 basó su elección en el diagnóstico experimental de diferentes números de patrones, de modo que los mismos presentaran la mayor variabilidad entre ellos por el comportamiento de sus valores de anomalías estandarizadas y consideró que las frecuencias de ocurrencias fueran similares en el periodo de estudio.

CAPITULO V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1 Patrones sinópticos en 700hPa asociados a las altas concentraciones de ozono troposférico en la ZMCM.

5.1.1 Distribución temporal de los clústeres obtenidos con el método SOM en el período 2003-2016 para los meses Feb-Jun.

El análisis SOM para los valores de altura de geopotencial (km) de 700hPa en el periodo de estudio, arrojó los resultados mostrados en la Fig. 5.1, donde se muestran los 6 clústeres obtenidos. Se introdujo al método un total de 308 días, y se obtuvo la mayor frecuencia de días para los clústeres 6, 3 y 1 con 65, 61 y 58 días, respectivamente; mientras que el clúster menos frecuente es el número 2 con solo 34 días del período (ver Fig. 5.2).

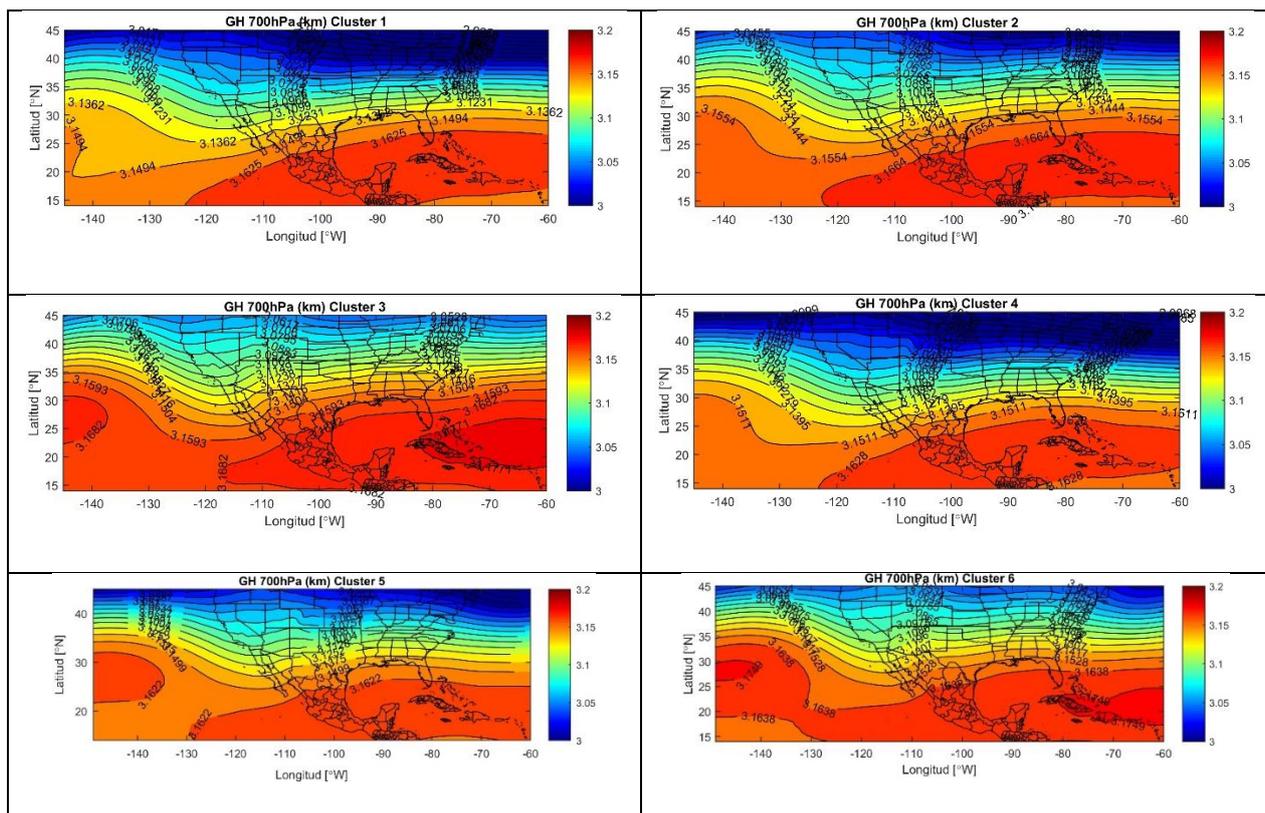


Figura 5.1 Clústeres de altura de geopotencial (gH) en 700 hPa para los días con altos valores de ozono troposférico (≥ 155 ppm) en el período 2003-2016 para los meses febrero- junio.

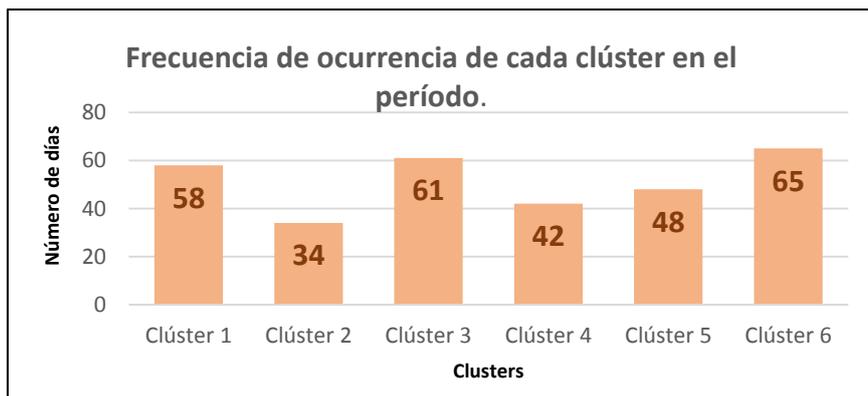


Figura 5.2 Frecuencia de ocurrencia de cada clúster en el período.

El análisis de la distribución de los conglomerados en los diferentes meses arrojó resultados interesantes, que permitieron validar la efectividad del método para el objetivo planteado. Como se observa en la Figura. 5.1, los diferentes regímenes climáticos que caracterizan cada clúster, presentan poca variación entre ellos; lo cual era de esperar de acuerdo a lo descrito en la bibliografía consultada, pues los eventos de altas concentraciones de ozono tienen lugar bajo la influencia anticiclónica tanto anticiclones de origen continental migratorio, como por la influencia de la periferia del Anticiclón Migratorio del Atlántico Norte. Sin embargo, estas pequeñas diferencias encontradas en los valores de altura de geopotencial de 700hPa son las que nos evidencian la efectividad del método para diferenciar entre una situación y otra, lo cual se complementará con la descripción de los sistemas sinópticos en la vertical, así como el análisis de la velocidad y dirección del viento de las estaciones de la cuenca.

En todos los casos los patrones sinópticos muestran el predominio de altos valores de altura de geopotencial extendidos desde el Atlántico hasta el mar Caribe, golfo de México, México y la costa occidental de dicho país, evidenciando la influencia del Anticiclón Subtropical Azores-Bermudas y la sucesión de anticiclones migratorios de origen continental. Los patrones asociados a los clústeres 5 y 6 también reflejan la presencia del anticiclón del Pacífico Oriental, aunque continúa siendo mayor sobre México y sus mares adyacentes la influencia del anticiclón Subtropical del Atlántico.

Fue posible a través del método analizar el comportamiento mensual de los diferentes patrones sinópticos para los meses de la temporada de ozono, por ejemplo, los patrones sinópticos (PS) asociados a los clústeres 1 y 4 no mostraron su presencia en los meses

de mayo y junio; mientras que los PS relacionados con los clústeres 3 y 6 no se observan en los meses de febrero y marzo. Asimismo, los PS asociados al clúster 2 no se observan en junio; en cambio los patrones sinópticos relacionados con el clúster 5 se evidenciaron en todos los meses, por lo menos dos días por mes del período estudiado (ver Fig. 5.3).

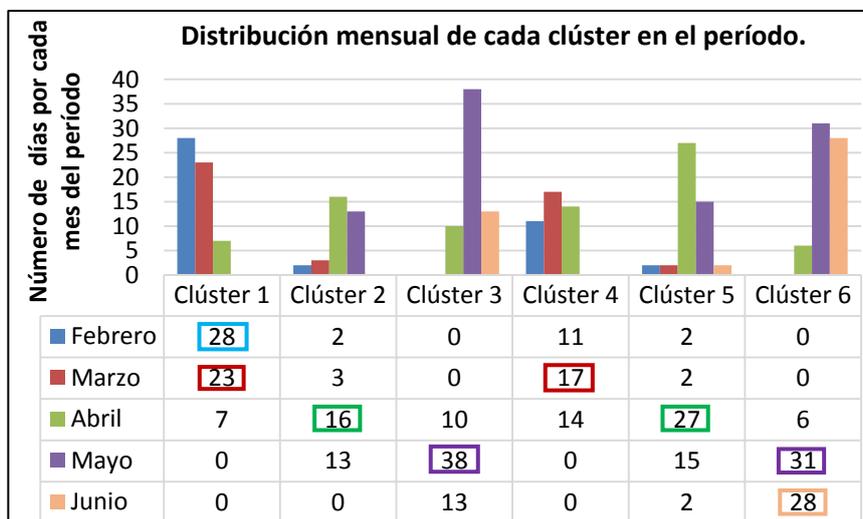


Figura 5.3 Distribución mensual por clúster en el período de estudio.

La distribución de los días por mes, del período analizado con concentraciones de ozono iguales o mayores a 154 ppb en alguna de las estaciones se muestra en la Tabla 5.1. De acuerdo a la misma, el mes con mayores excedencias y problemas por este contaminante es el mes de mayo con 97 casos, seguido del mes de abril con 80; y los meses de menores excedencias fueron febrero y junio, ambos con 43 casos.

Febrero	43
Marzo	45
Abril	80
Mayo	97
Junio	43

Tabla 5.1 Número de días por mes que se introdujo al método.

Estos resultados son consecuentes con los que ofrece la climatología del ozono de acuerdo a la Fig. 5.4.

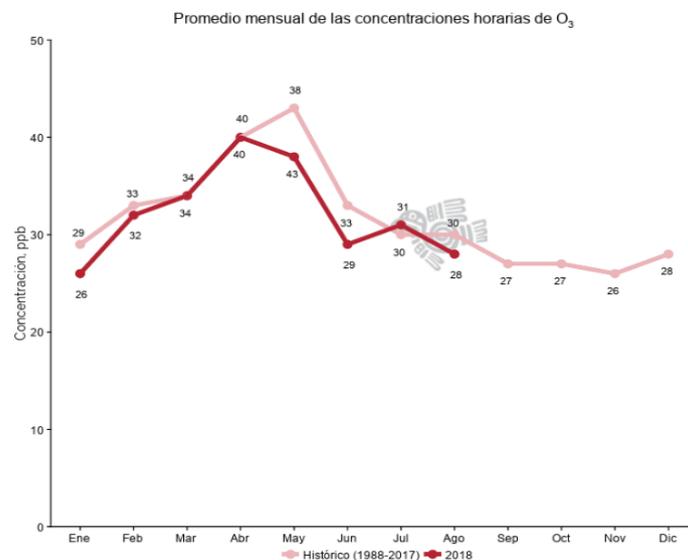


Figura 5.4 Histórico de los promedios mensuales de las concentraciones horarias de ozono.

(Fuente: SEDEMA, <http://www.aire.cdmx.gob.mx>)

Teniendo en cuenta la distribución mensual por clúster se observa que los casos del mes de mayo se agrupan en C3 y C6, con 38 y 31 días respectivamente. En abril los eventos se agrupan en el C5 y C2, con 27 y 16 casos respectivamente; aunque es válido comentar que este es el único mes que está representado en todos los clústeres. En marzo el mayor número de eventos ocurrió bajo el C1 con 23 casos, seguido del C4 con 17. En febrero se correspondieron los episodios de altas concentraciones con el C1 formado por 28 días y en junio con el C6 representado por 28 días igualmente.

5.1.2 Análisis sinóptico y del vector del viento en superficie, de los patrones sinópticos asociados a los clústeres obtenidos.

Para el análisis de los patrones sinópticos que caracterizan las situaciones de contingencias atmosféricas por altas concentraciones de ozono, se tuvo en cuenta el porcentaje de ocurrencia de eventos dentro de un mismo clúster, de modo que como se mencionó en el apéndice anterior, fue posible describir el patrón sinóptico de acuerdo al mes o los meses más recurrentes dentro de un mismo clúster. De ahí una de las ventajas de la aplicación del método SOM para facilitar y agilizar el análisis.

Para el C1 los meses que presentaron el porcentaje más alto fueron febrero y marzo con un 48 % y 39,6 %, respectivamente. Desde el punto de vista subjetivo del análisis sinóptico se trató de describir y considerar “patrón sinóptico” todo aquel que se repitió un 25% de las veces; tratando de describir la mayor cantidad de situaciones sinópticas favorables para la ocurrencia de contingencias, con el fin de proveer herramientas al pronosticador y a las autoridades involucradas para la toma de decisiones.

1. *Vaguada inducida por dos anticiclones en el flujo del este.*

La Fig. 5.5 muestra el PSF1 (19/02/2016): en el mapa de flujo de 700 hPa se observa una amplia circulación anticiclónica sobre el NW de México y otro centro sobre el N del golfo de México, ambos centros generando una zona de vaguada en el flujo del E en los alrededores de Ciudad de México. En 500 hPa el sistema anticiclónico desciende en latitud y está representado por un centro al OSO de México, sobre el Pacífico adyacente a México, imponiendo sobre el centro del país un flujo del NO. En el mapa de 250 hPa el centro de alto geopotencial desciende al S de 20 ° N e impone un flujo convergente del OSO de aproximadamente 50 km/h. Un chorro subtropical se observa sobre el N de México y el SE del golfo del mismo nombre. Los valores de humedad relativa son bajos en los niveles de 500 y 700 hPa sobre CDMX, mientras el flujo húmedo del OSO en niveles altos mantiene valores de humedad relativa cercanos al 90%.

Bajo estas condiciones las concentraciones en superficie mostraron el siguiente comportamiento desde las 13 hasta las 17 horas de acuerdo a los valores medidos en cada estación como se observa en la Fig. 5.6.

Las estaciones que reportaron valores por encima de 155 ppb fueron las del SE de la ZMCM (MPA y CHO); los valores comenzaron a elevarse a partir de las 16 (hora local), a las 17 h en la estación CHO disminuye y se eleva en MPA. En la Fig. 4.7 se observa que las estaciones de la mitad NE, midieron viento predominantemente del NW al N que podría explicar la advección de ozono hacia las estaciones con picos; en este caso se habla de advección de ozono y no de precursores pues dichas estaciones mantuvieron valores de temperatura muy bajos por lo que se estima que los máximos se debieron al transporte del contaminante secundario y no a la producción en el sitio.

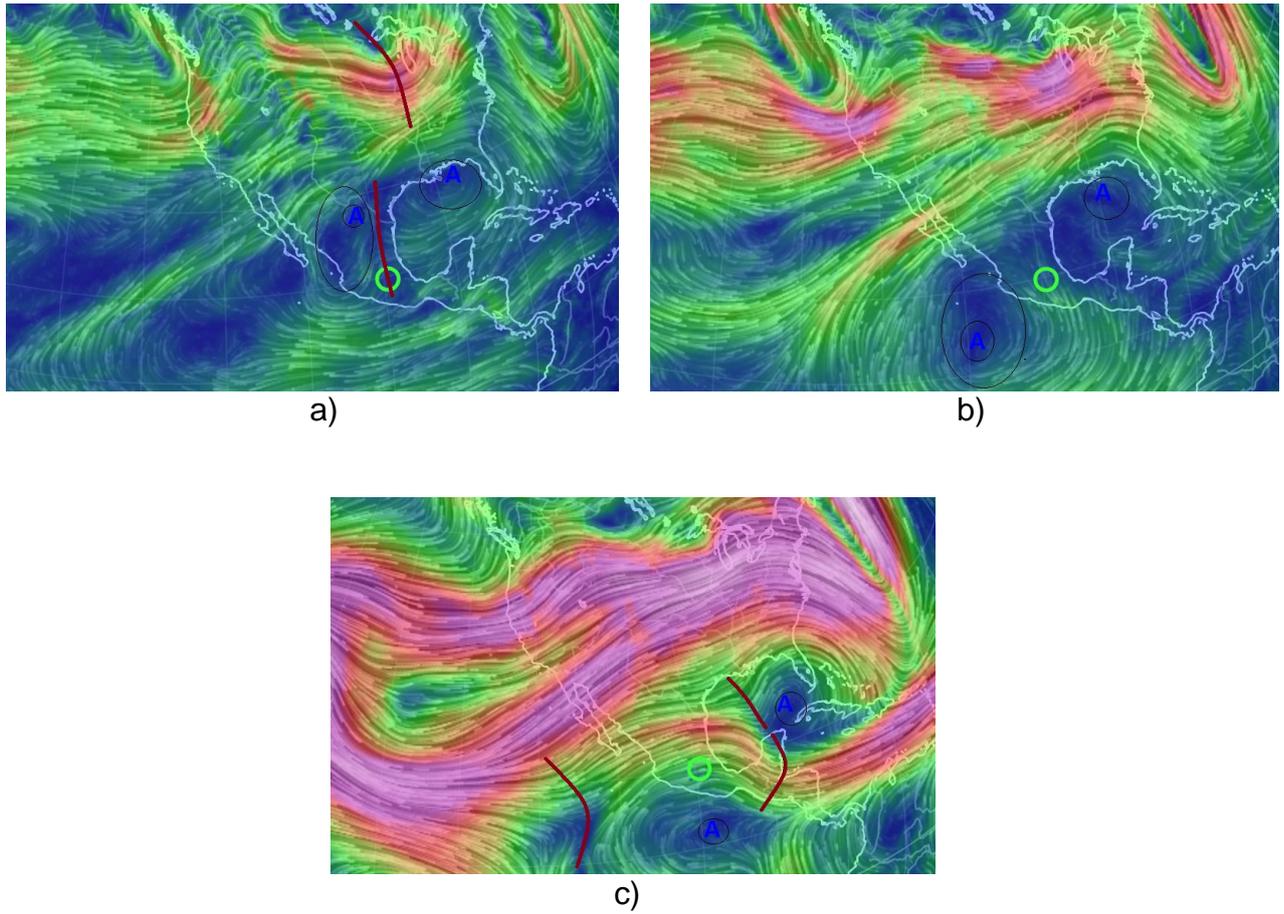


Figura 5.5 PSF1: Mapas de flujo del día 19 de febrero de 2016 a las 1800UTC para los niveles de presión de a) 700 hPa, b) 500 hPa, c) 200 hPa.

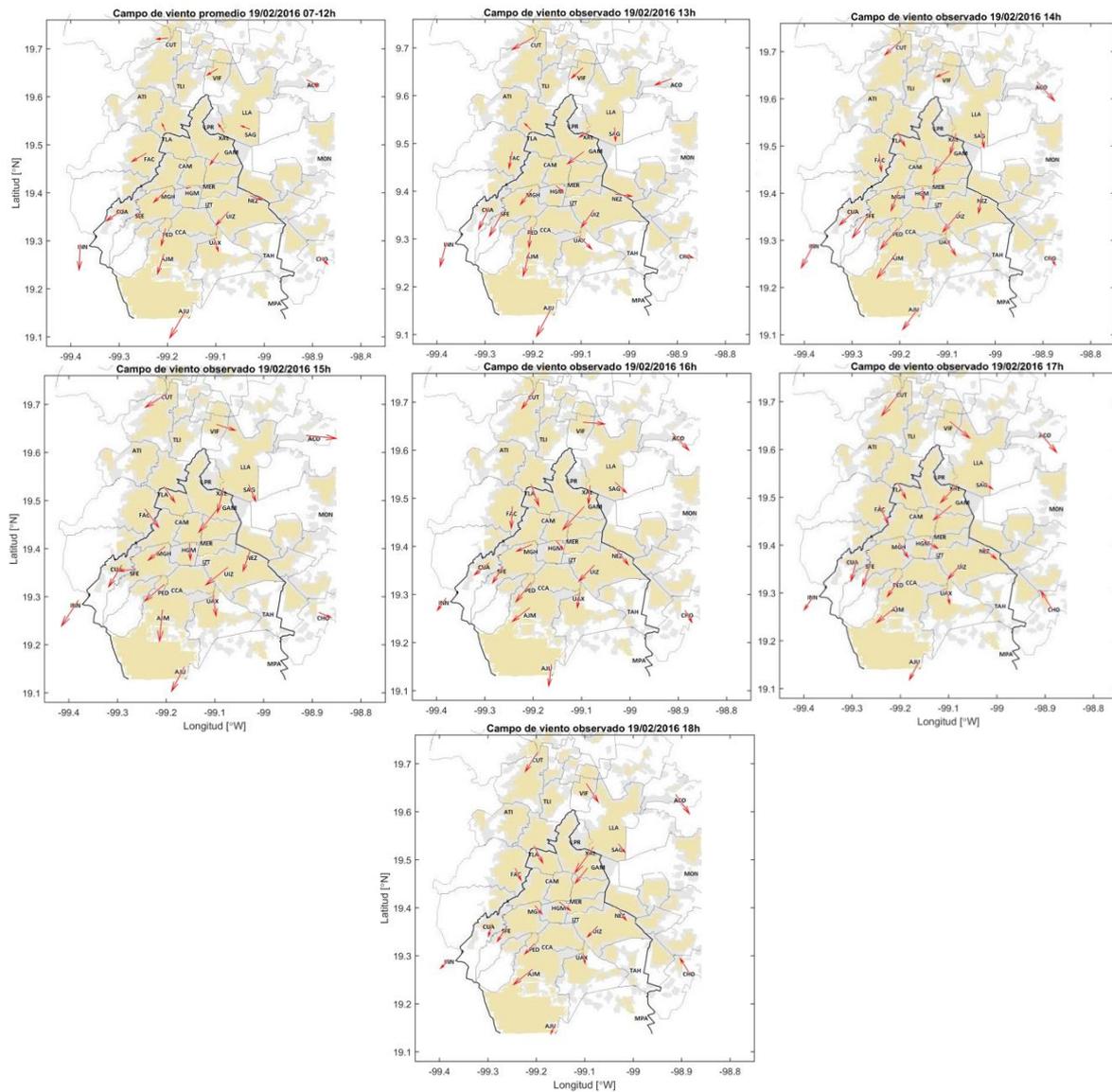


Figura 5.7 Campo de viento para las horas indicadas: promedio para la mañana (7-12 horas) en el caso de la primera imagen y en el resto se muestra valores observados de la velocidad y dirección del viento durante la hora indicada para cada estación. El tamaño del vector es proporcional a la magnitud de la velocidad del viento.

2. Vaguada polar (intrusión de ozono estratosférico).

En la Fig. 5.8 se muestra el PSM1: este patrón refleja la situación peculiar de intrusión de ozono estratosférico en las capas bajas de la tropósfera. En el mapa de 250 hPa se observa un centro de bajo geopotencial en las proximidades de Texas y la onda polar que se extiende desde la misma hacia el S, sobre la porción E del golfo de México, profundizándose al S de 20 ° N. En 500 hPa la zona baroclínica posee similar posición que en 250 hPa; mientras que en 700 hPa la onda se observa ligeramente rezagada de

manera que cruza los 20° N en las cercanías de CDMX. En todos los niveles la tropósfera posee valores de humedad relativa inferiores al 35%. En la altura hay predominio de fuerte convergencia por detrás de la zona frontal, con corrientes que alcanzan los 120 km/h.

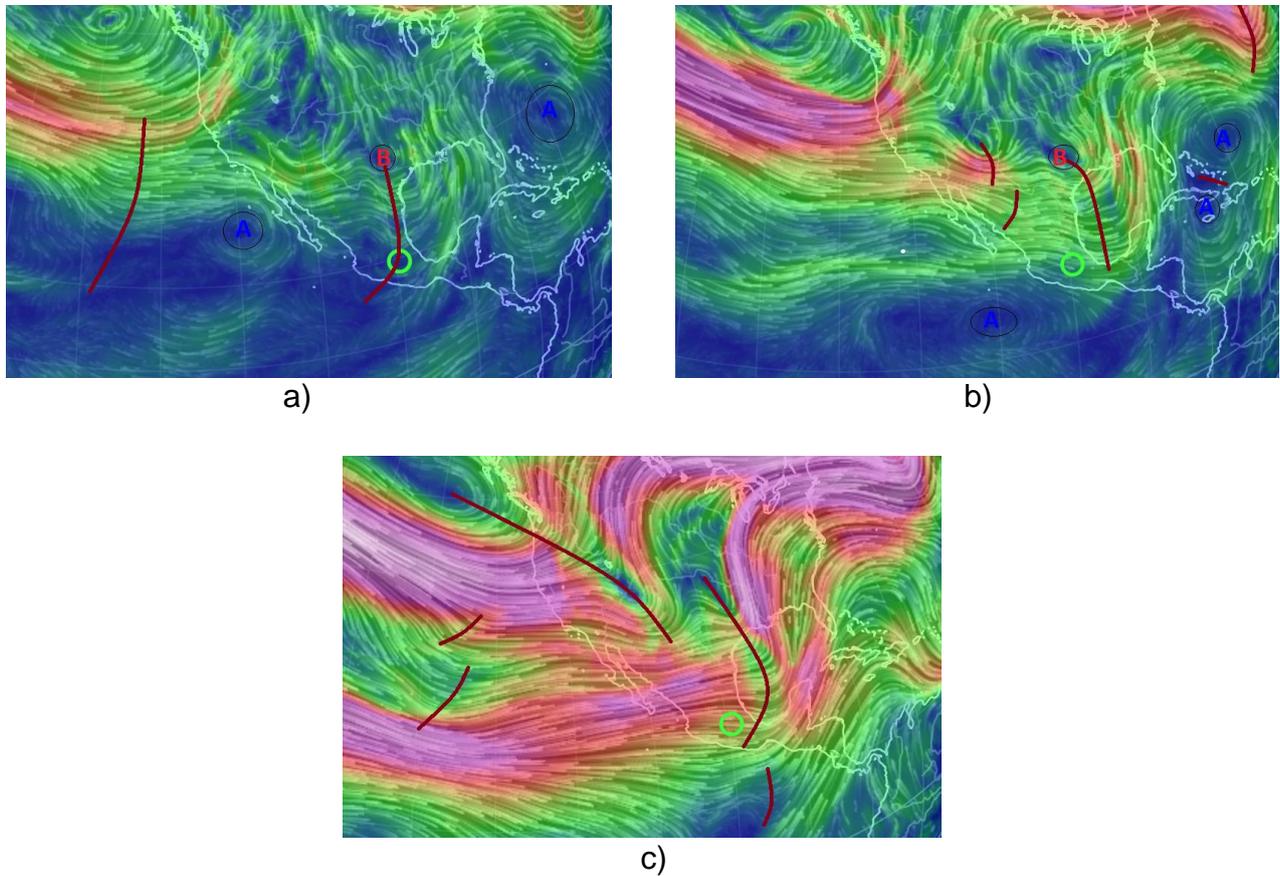


Figura 5.8 PSM1: Mapas de flujo del día 12 de marzo de 2016 a las 1800UTC para los niveles de presión de: a) 700 hPa, b) 500 hPa, c) 200 hPa.

Baja las condiciones sinópticas descritas, el 12 de marzo de 2016 en las estaciones del N y centro de CDMX (FAC, GAM Y HGM) se midieron picos de ozono superiores a 155 ppb Fig. 5.9.

Las estaciones implicadas reportaron viento moderado del NE mientras HGM a partir de las 16 horas y continuaron los máximos hasta las 18 horas de acuerdo a los vientos débiles del NE al N.

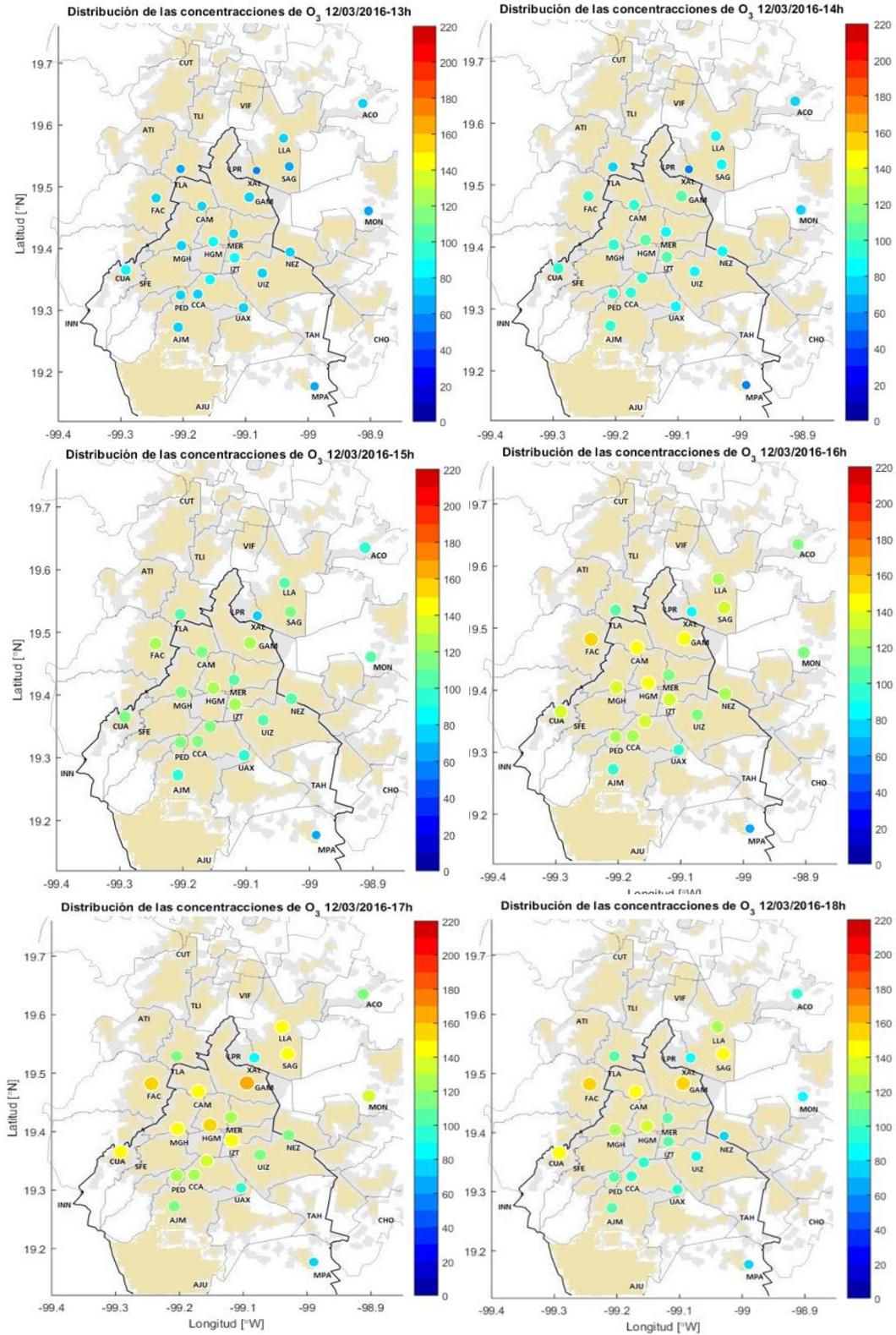


Figura 5.9 Concentraciones horarias de ozono medidas en las estaciones de la RAMA. La escala muestra los valores en ppb.

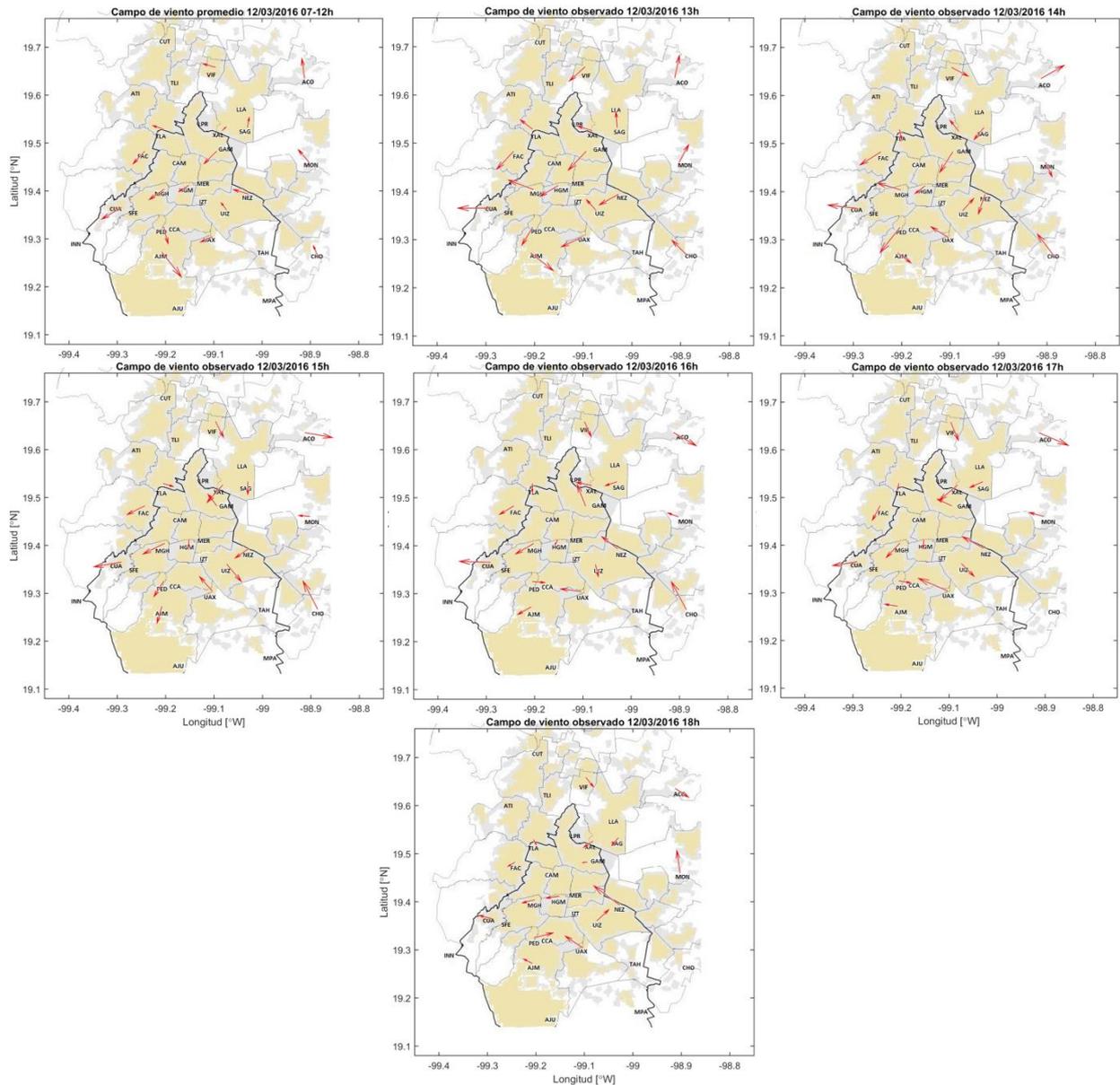


Figura 5.10 Campo de viento para las horas indicadas: promedio para la mañana (7-12 horas) en el caso de la primera imagen y en el resto se muestra valores observados de la velocidad y dirección del viento durante la hora indicada para cada estación. El tamaño del vector es proporcional a la magnitud de la velocidad del viento.

3. Anticiclón sobre el centro de México.

En la Fig. 5.11 se representa el PSMa1 (04/05/2016) bajo esta situación predomina en toda la vertical la influencia de los centros de alto geopotencial sobre Ciudad de México; en este caso una amplia celda anticiclónica se observa sobre el centro de México en toda la vertical con similar ubicación; por lo que hay condiciones de estabilidad atmosférica en el área, movimientos verticales descendentes sobre la Ciudad con un flujo de escala

sinóptica del O al NO. Los valores de humedad en toda la capa se muestran inferiores al 40 %. Un centro anticiclónico de origen continental migratorio ubicado al N de México, avanza detrás de una zona frontal; de ahí que el día siguiente también presenta condiciones similares y genera nuevamente altas concentraciones de ozono troposférico en la Ciudad de México.

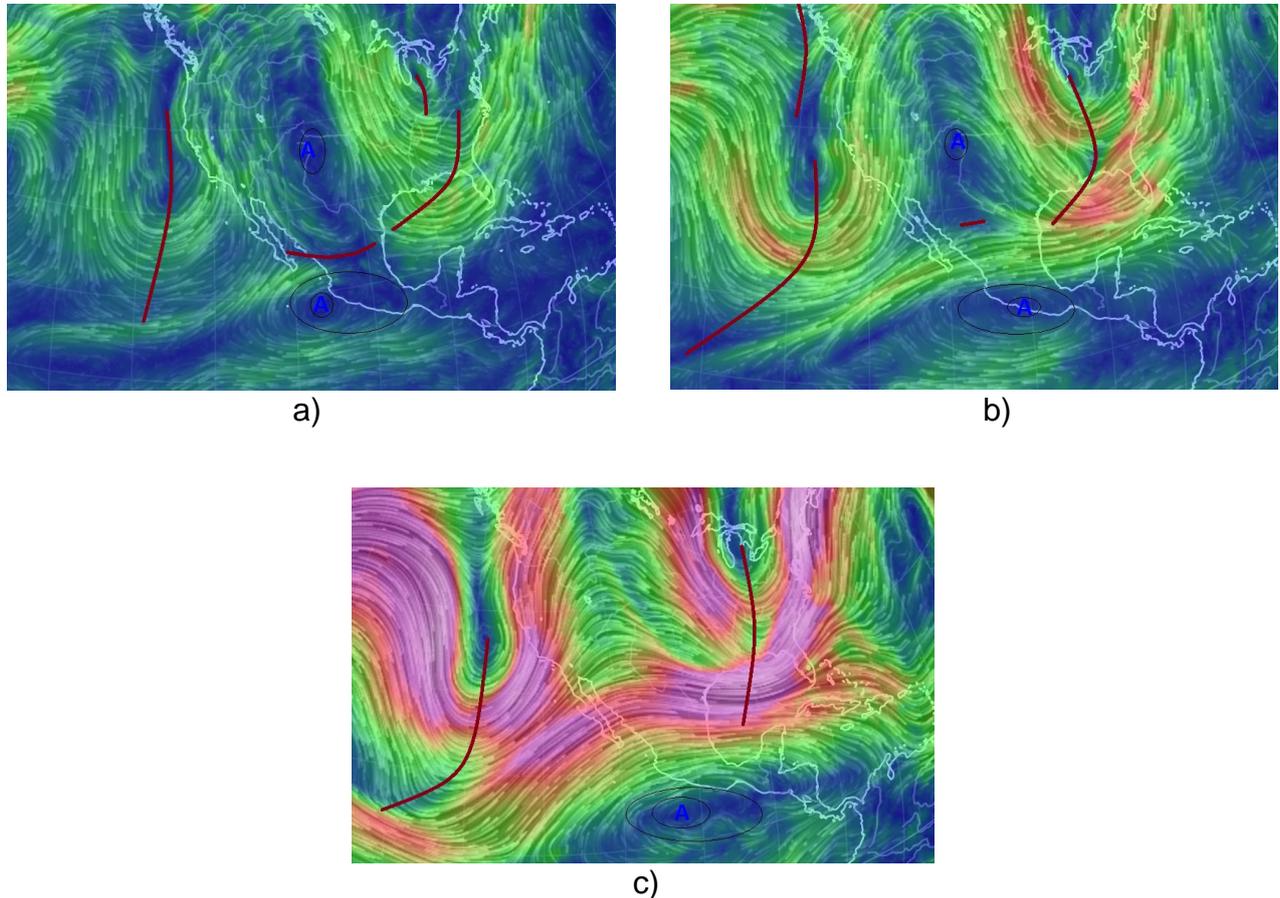


Figura 5.11 PSMa2: Mapas de flujo del día 4 de mayo de 2016 a las 1800UTC para los niveles de presión: a) 700 hPa, b) 500 hPa, c) 200 hPa.

El 4 de mayo de 2016 desde las 13 horas las estaciones del sur de la CDMX comenzaron a medir valores de ozono superiores a 155 ppb, inicialmente en la estación PED y continuaron luego en las estaciones cercanas COY, CCA, SFE, CUA y AJM; a las 16 horas los valores habían descendido en casi todas las estaciones excepto en AJM, donde a las 17 horas aún se medían valores sobre los 150 ppb. A juzgar por el campo de viento (Fig. 5.13), la convergencia del viento del N al NE en las estaciones de la cuenca favoreció el episodio; así mismo se medían valores de temperatura elevados entre 26 y 30 ° C desde las 14 horas en casi todas las estaciones, como es característico de la ZMCM en el mes de mayo. Estas condiciones a mesoescala, favorecidos por la subsidencia generada por

el sistema anticiclónico en 700 hPa y los cielos despejados provocó los altos valores de ozono al SO de la Ciudad.

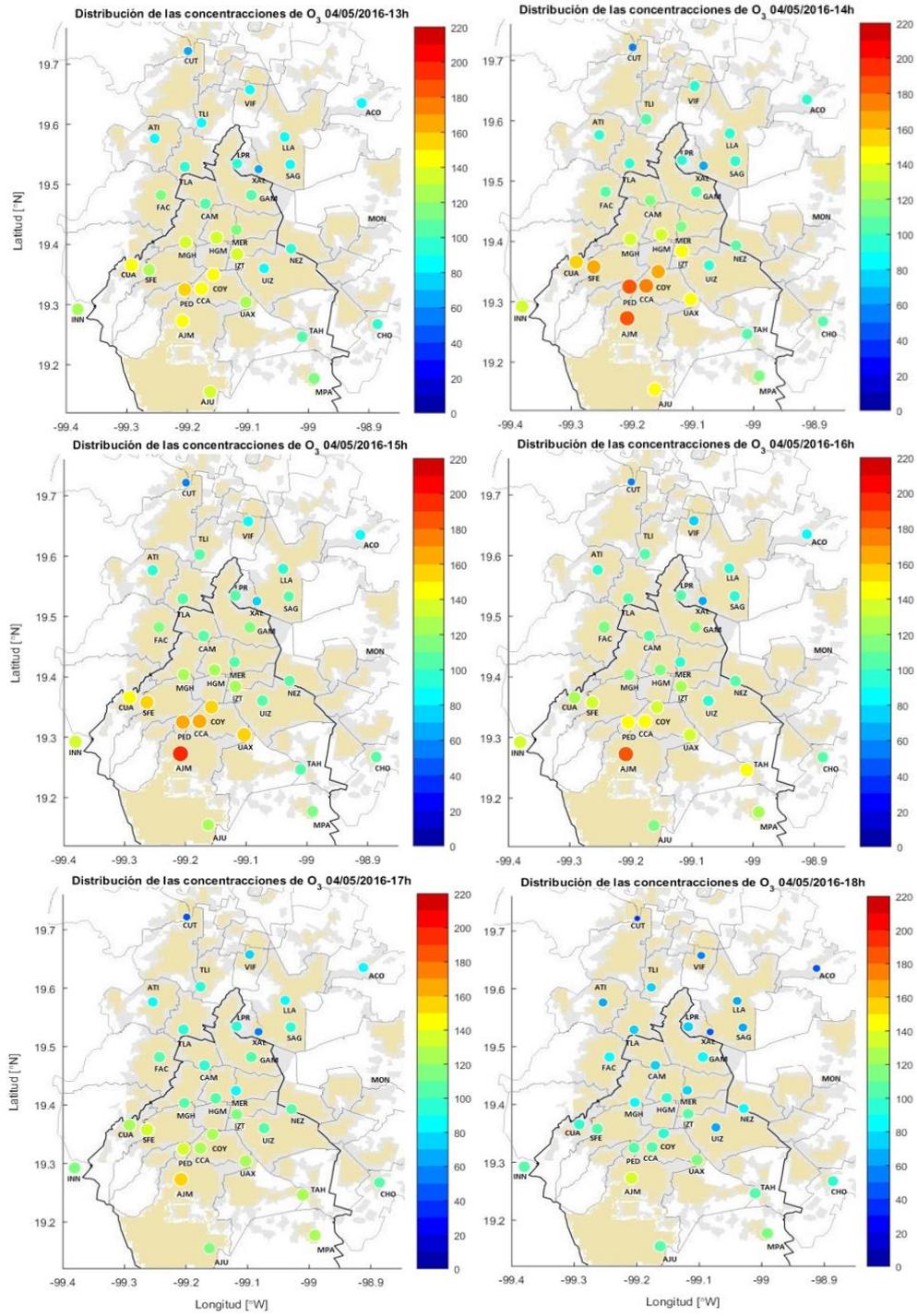


Figura 5.12 Concentraciones horarias de ozono medidas en las estaciones de la RAMA. La escala muestra los valores de concentración en ppb.

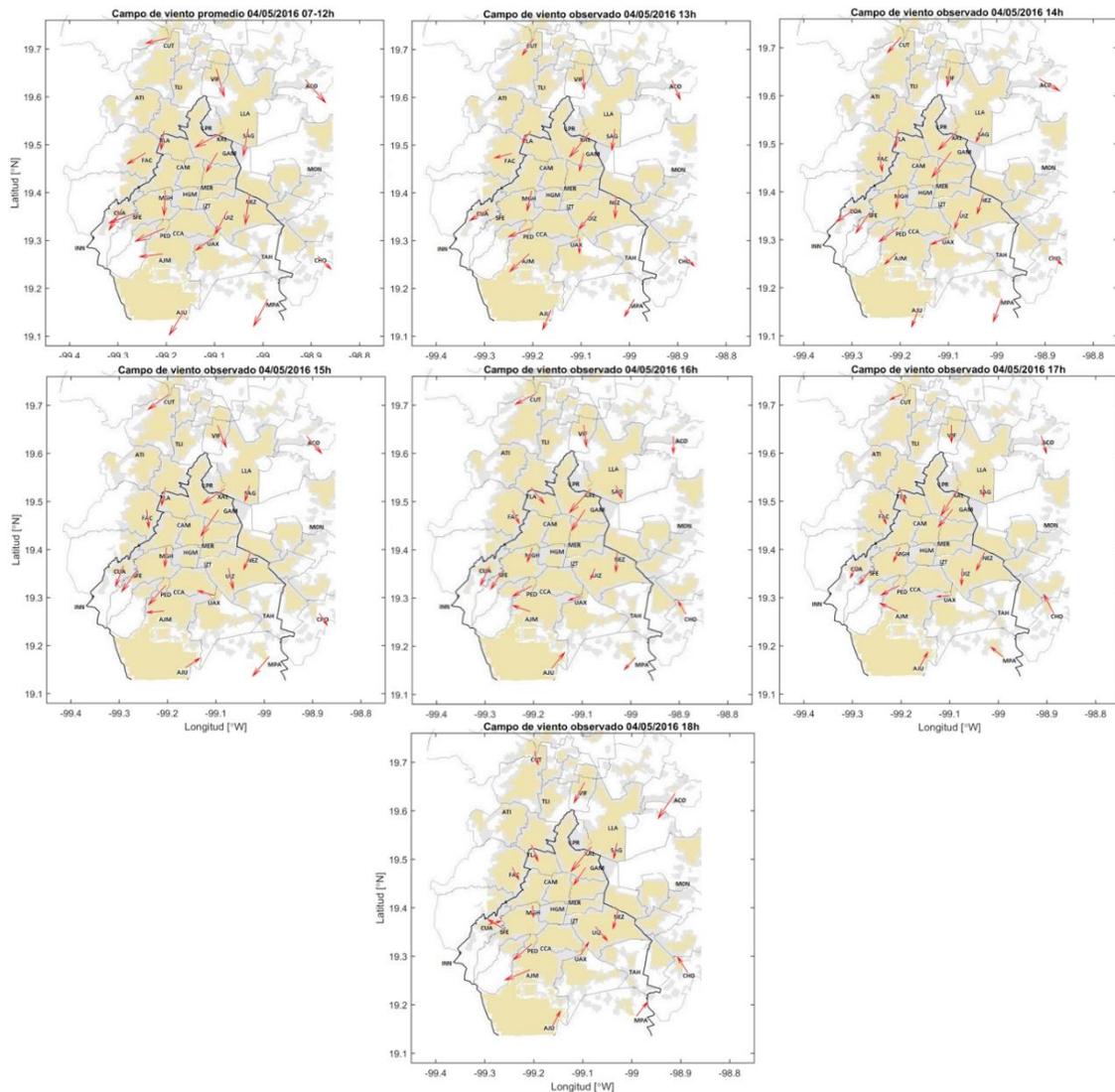


Figura 5.13 Campo de viento para las horas indicadas: promedio para la mañana (7-12 horas) en el caso de la primera imagen y en el resto se muestra valores observados de la velocidad y dirección del viento durante la hora indicada para cada estación. El tamaño del vector es proporcional a la magnitud de la velocidad del viento.

4. Débil influencia anticiclónica subtropical.

Este patrón (Fig. 5.14 PSMa3) caracteriza la débil influencia anticiclónica, se observa en 700 hPa el retorno del anticiclón Subtropical del Atlántico sobre oeste del golfo de México, y una débil celda anticiclónica se localiza sobre Guerrero, de modo que un débil gradiente bórico influye sobre la Ciudad de México. En 500 y 250 hPa los centros de alto valor geopotencial se desplazan al S de 20 ° N e imponen un flujo del O-SO sobre el área de estudio, con valores de humedad relativa que solo alcanzan el 50 % en niveles altos, y permanece inferior en el resto de los niveles analizados.

Bajo estas condiciones desde las 14 horas se elevan los valores de ozono en el SO de la Ciudad simultáneamente en estaciones del O, centro y N de la Ciudad, con máximos entre las 14 y 15 horas en SFE y CUA respectivamente. Durante la mañana predominaron vientos débiles de región NE que luego permanecen muy variables en dirección, a partir de las 15 horas se observa un giro del viento a favor de las manecillas del reloj, de modo que en las últimas horas de la tarde los vientos predominarán de región S. Debido a la debilidad del flujo sinóptico los vientos en superficie estuvieron dominados por la escala local. En este caso la debilidad de los vientos estuvo generando el estancamiento de contaminantes primarios en gran parte de la Ciudad; los valores de temperatura máximos estuvieron relacionados con los máximos de ozono en casi todas las estaciones; sin embargo, en SFE y CUA donde se midieron los máximos de ozono globales las temperaturas no superaron los 25 ° C, lo cual podría explicarse por la advección de ozono hacia dichas estaciones y no a la producción sobre esa área.

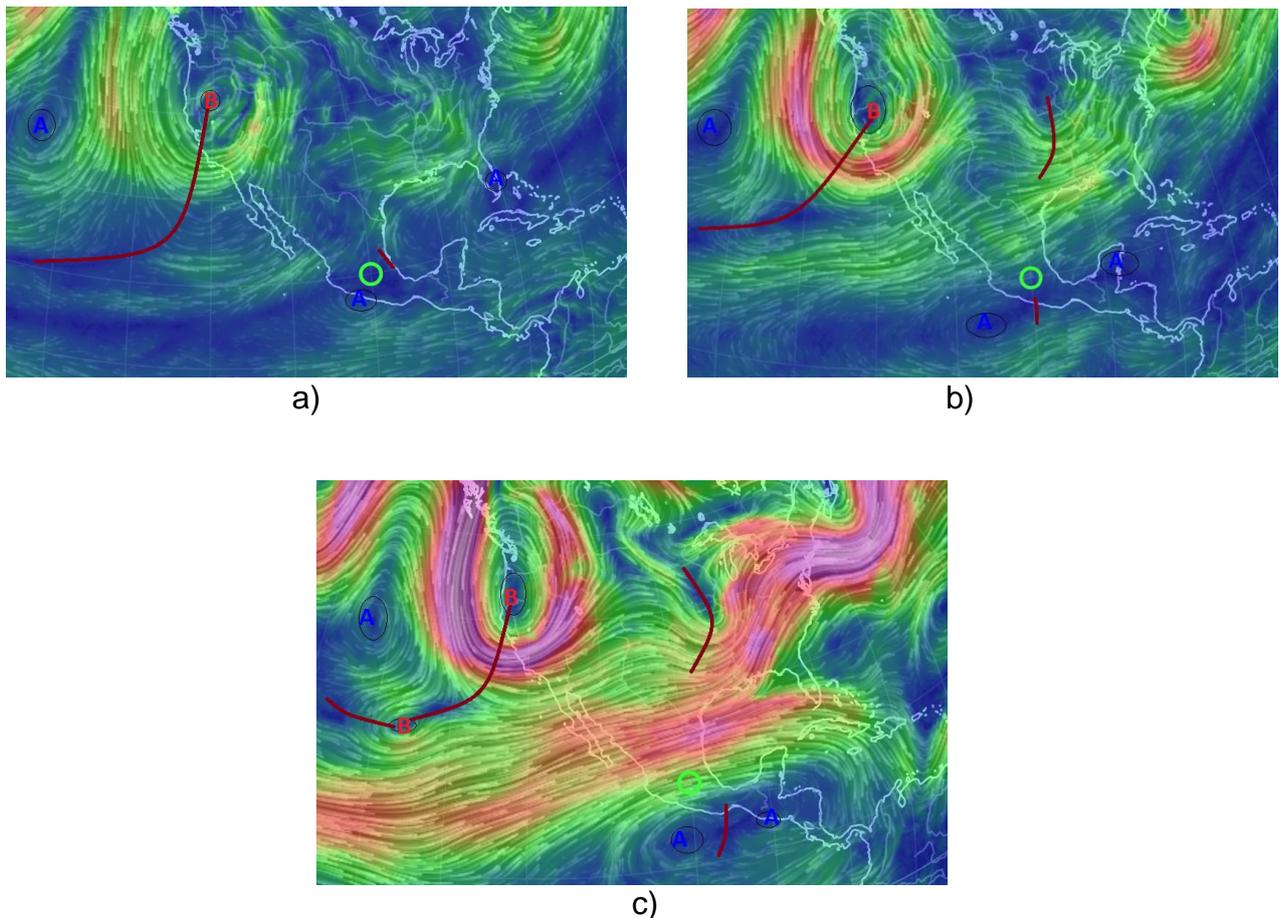


Figura 5.14 PSMa3-1: Mapas de flujo del día 20 de mayo de 2016 a las 1800UTC para los niveles de presión de: a) 700 hPa, b) 500 hPa, c) 200 hPa.

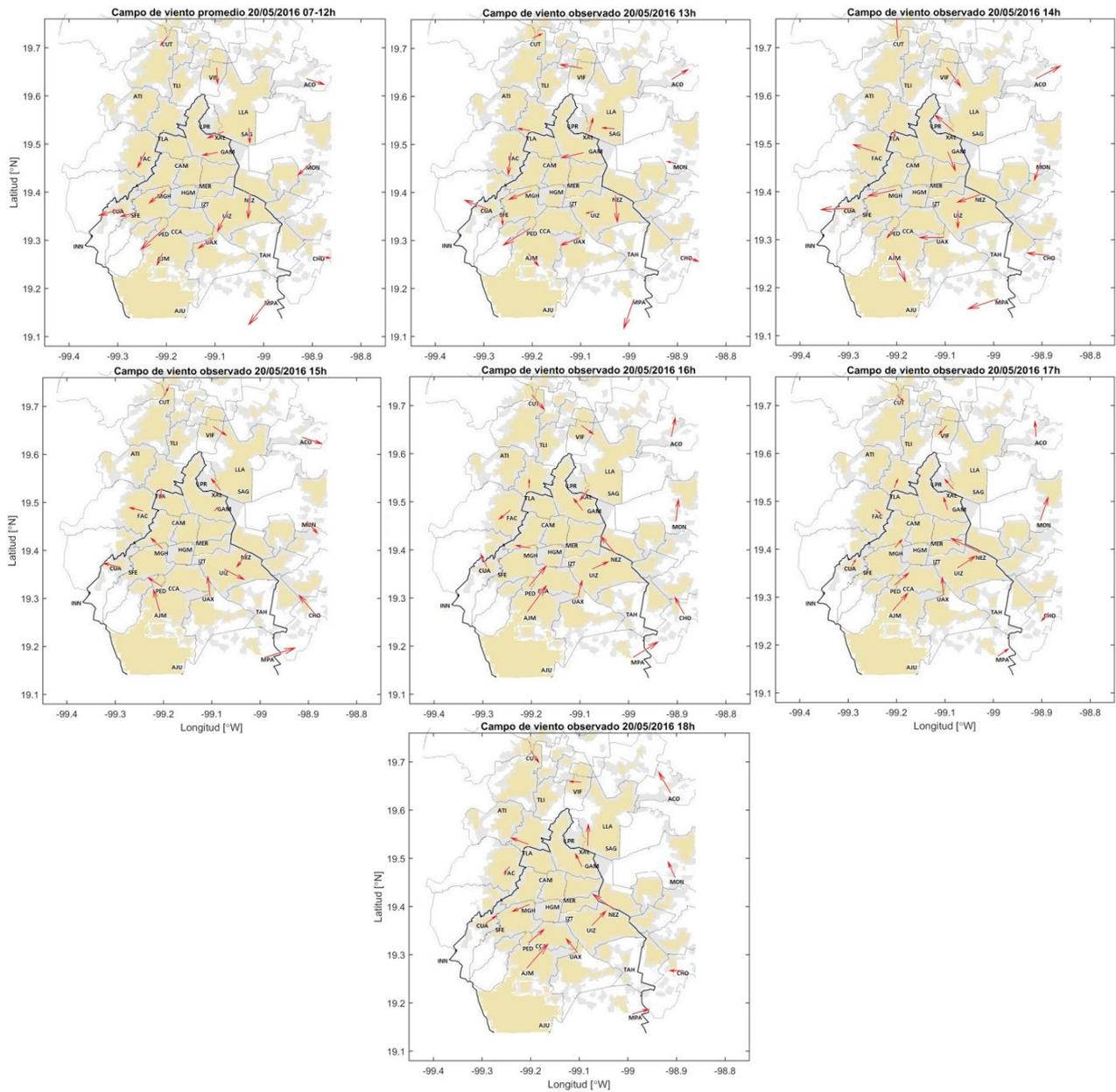


Figura 5.16 Campo de viento para las horas indicadas: promedio para la mañana (7-12 horas) en el caso de la primera imagen y en el resto se muestra valores observados de la velocidad y dirección del viento durante la hora indicada para cada estación. El tamaño del vector es proporcional a la magnitud de la velocidad del viento.

5. Amplio anticiclón migratorio de origen continental sobre el Norte y centro de México.

El patrón en la Fig. 5.17 muestra en los niveles bajos de la atmósfera un amplio anticiclón migratorio de origen continental que se expande sobre el sur y centro de México, con sus centros principales ubicados sobre el W del golfo de México y sobre el estado de Jalisco que impone un flujo débil del N sobre la ZMCM; en 500 hPa esta celda se desplaza

ligeramente hacia el sur e intensifica con la altura mostrando un único centro en las inmediaciones de la cuenca de Ciudad de México. En los niveles altos el sistema anticiclónico desciende hacia el suroeste sobre el Pacífico adyacente e impone un flujo del NW de aproximadamente 75 km/h sobre la ZMCM. De modo general el flujo sinóptico se mantiene en toda la vertical del NW al N favoreciendo los movimientos descendentes en toda el área de estudio.

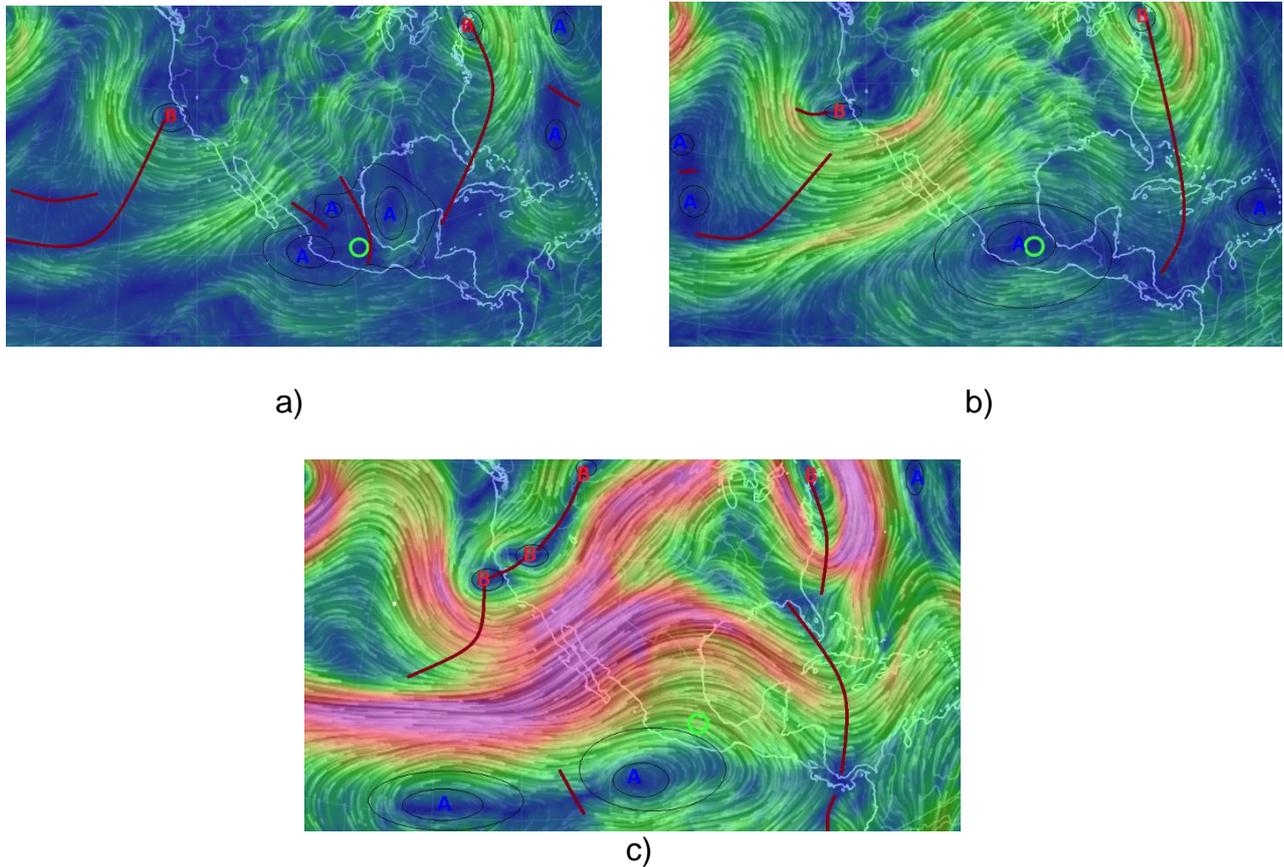


Figura 5.17 PSMa3-3: Mapas de flujo del día 24 de mayo de 2016 a las 1800UTC para los niveles de presión de: a) 700 hPa, b) 500 hPa, c) 200 hPa.

Las estaciones de la cuenca CAM, SFE, CUA midieron valores superiores a 150 ppb a las 14,15 y 16 horas respectivamente al orden de mencionado de las estaciones. Como se observa en la Fig.4.19 la convergencia del viento jugó un papel fundamental para que ocurrieran los picos como en los casos anteriores.

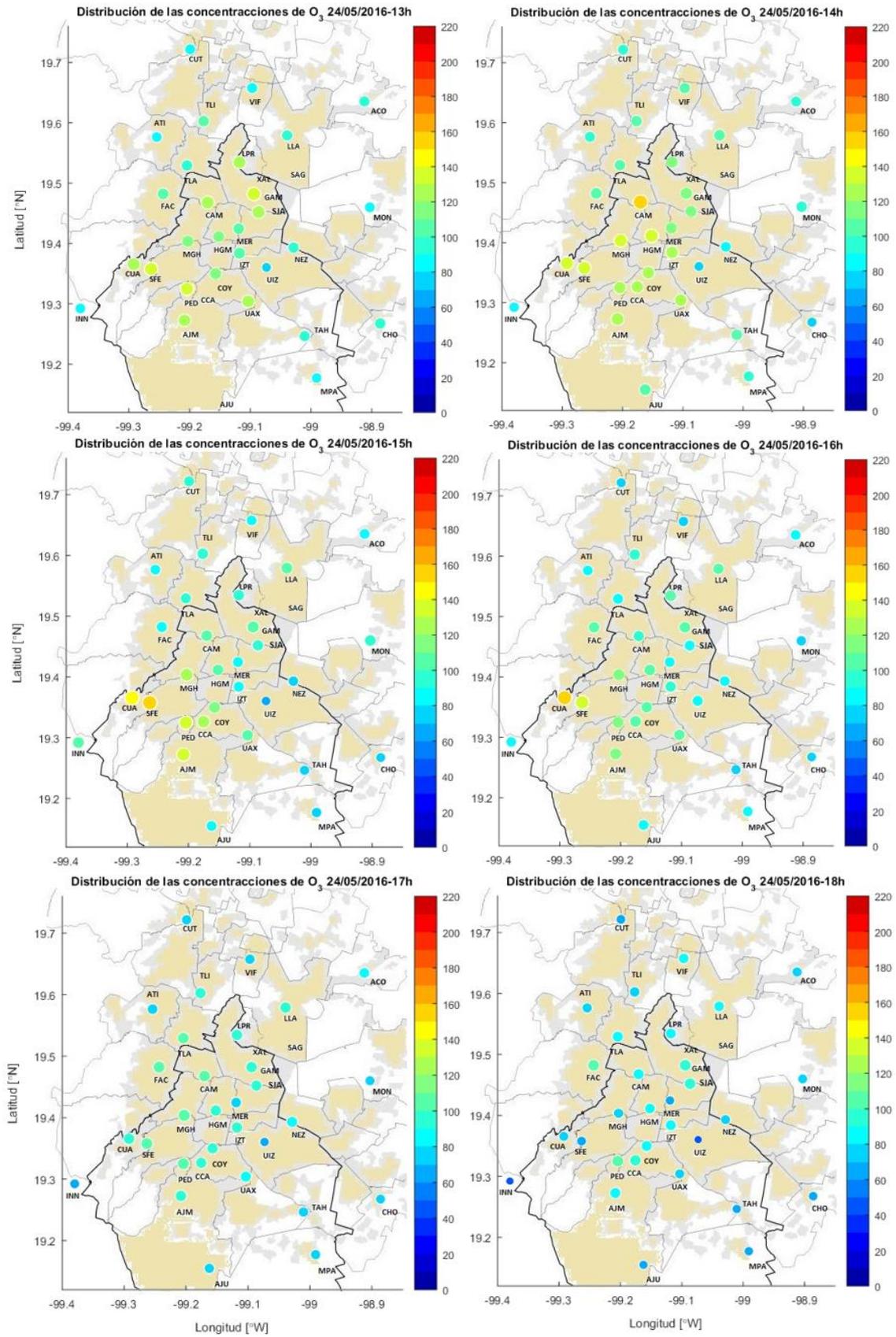


Figura 5.18 Concentraciones horarias de ozono medidas en las estaciones de la RAMA. La escala muestra los valores de concentración en ppb.

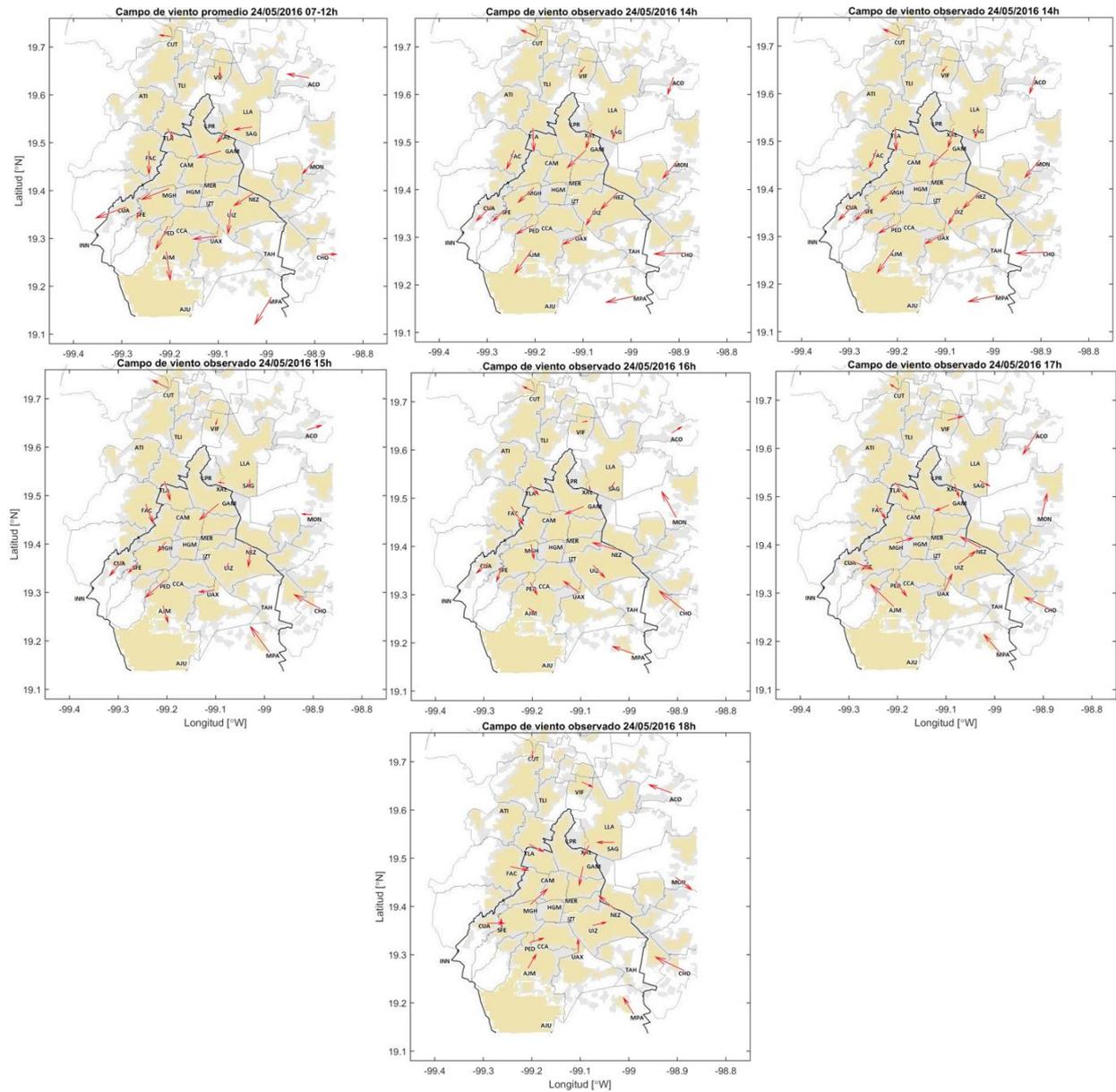


Figura 5.19 Campo de viento para las horas indicadas: promedio para la mañana (7-12 horas) en el caso de la primera imagen y en el resto se muestra valores observados de la velocidad y dirección del viento durante la hora indicada para cada estación. El tamaño del vector es proporcional a la magnitud de la velocidad del viento.

6. Onda corta en 500hPa.

El patrón sinóptico PSA4 (8/04/2015) muestra en las cercanías de la ZMCM en 700 hPa una zona de vaguada en el flujo del este, reflejo de una onda corta en niveles medios sobre el centro de México como se observa en el mapa de flujo de 500 hPa. A este sistema se superpone un fuerte flujo convergente superior del NW que alcanza hasta 100 km/h y valores de humedad del 85 %. Esta situación poco común y que favorezca un episodio

puede encontrar explicación en una profunda inversión térmica (ver radiosondeo de las 12 UTC, Anexo 1) en horas de la mañana (como es común su formación en zonas de bajas cálidas) con un anticiclón en 500 hPa y fuerte subsidencia favorecida por la convergencia superior.

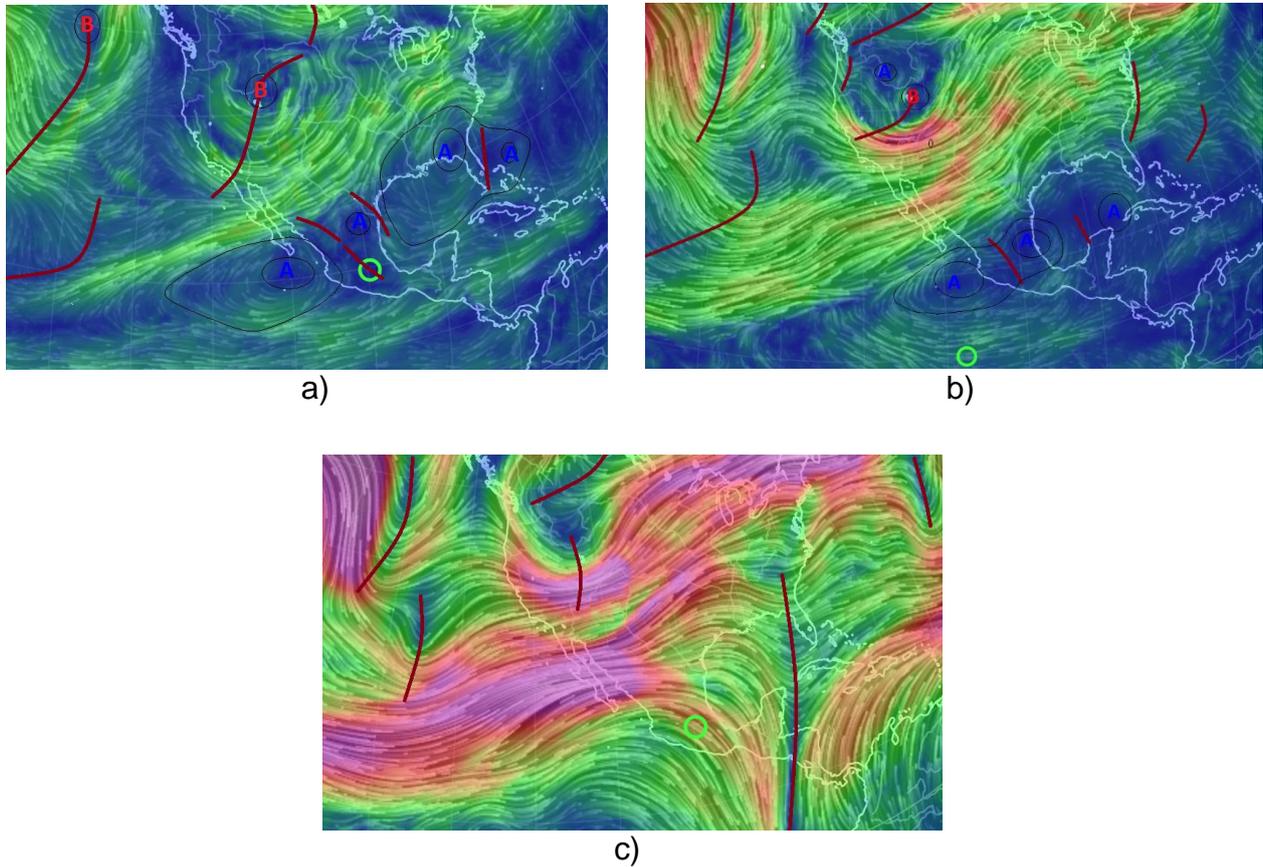


Figura 5.20 PSA4: Mapas de flujo del día 8 de abril de 2015 a las 1800UTC para los niveles de presión de: a) 700 hPa, b) 500 hPa, c) 200 hPa.

El día 8 de abril de 2015 se elevan las concentraciones de ozono a partir de las 15 horas en SFE y CUA; para las 17 horas han disminuido los valores en dicha área y se elevan en la estación FAC por encima de 155ppb y en estaciones cercanas también aumentan los valores sin sobrepasar los 150 ppb. El campo de viento durante la mañana y hasta las 16 horas muestra direcciones entre el NE y E en gran parte de las estaciones de la mitad N de la cuenca; mientras q a partir de las 17 horas se observan direcciones predominantes de región S que evidentemente están conllevando a detonar episodios al N de la Ciudad.

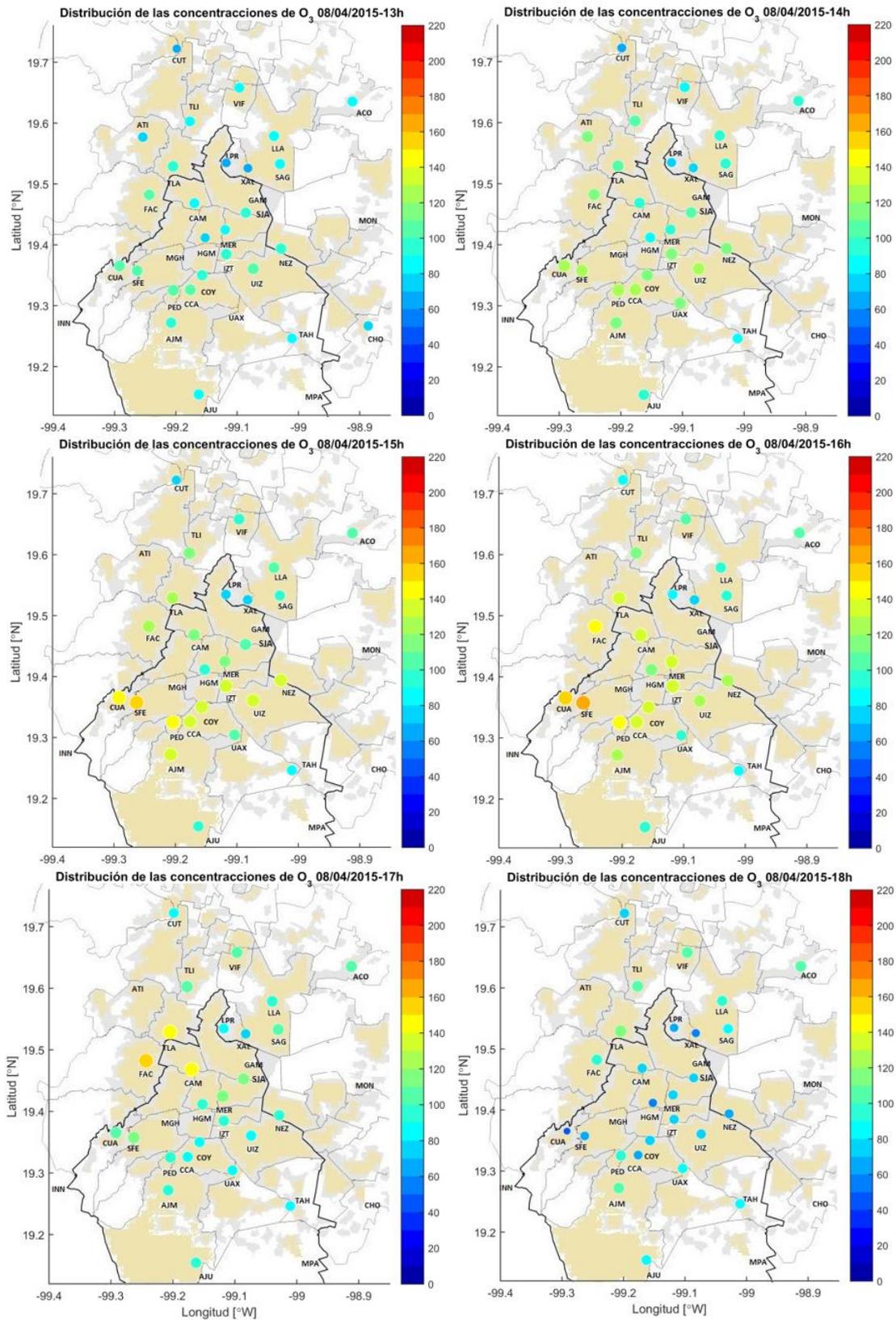


Figura 5.21 Concentraciones horarias de ozono medidas en las estaciones de la RAMA. La escala muestra los valores de concentración en ppb.

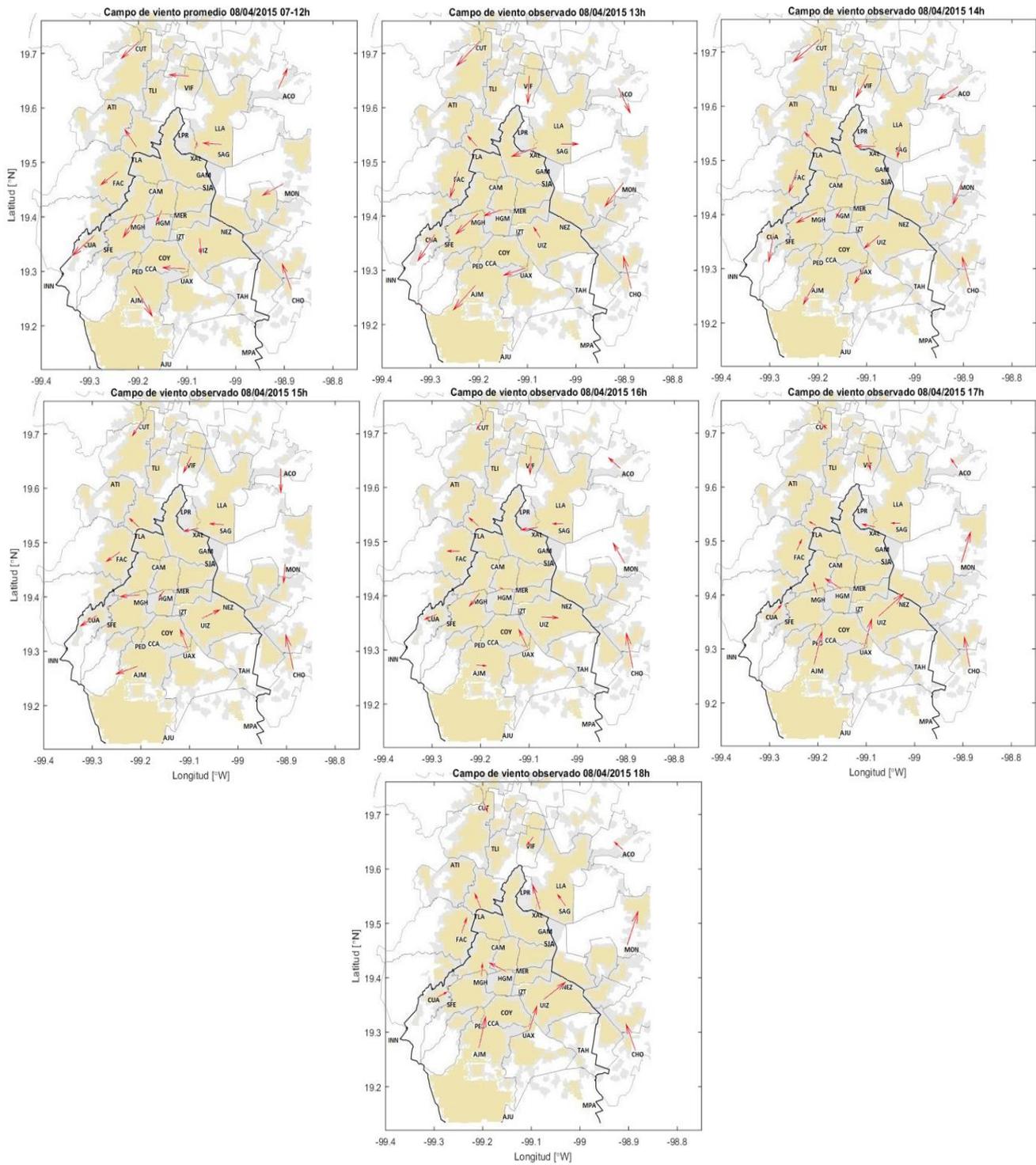


Figura 5.22 Campo de viento para las horas indicadas: promedio para la mañana (7-12 horas) en el caso de la primera imagen y en el resto se muestra valores observados de la velocidad y dirección del viento durante la hora indicada para cada estación. El tamaño del vector es proporcional a la magnitud de la velocidad del viento.

7. Anticiclón sobre el centro y NE de México con jet subtropical superpuesto.

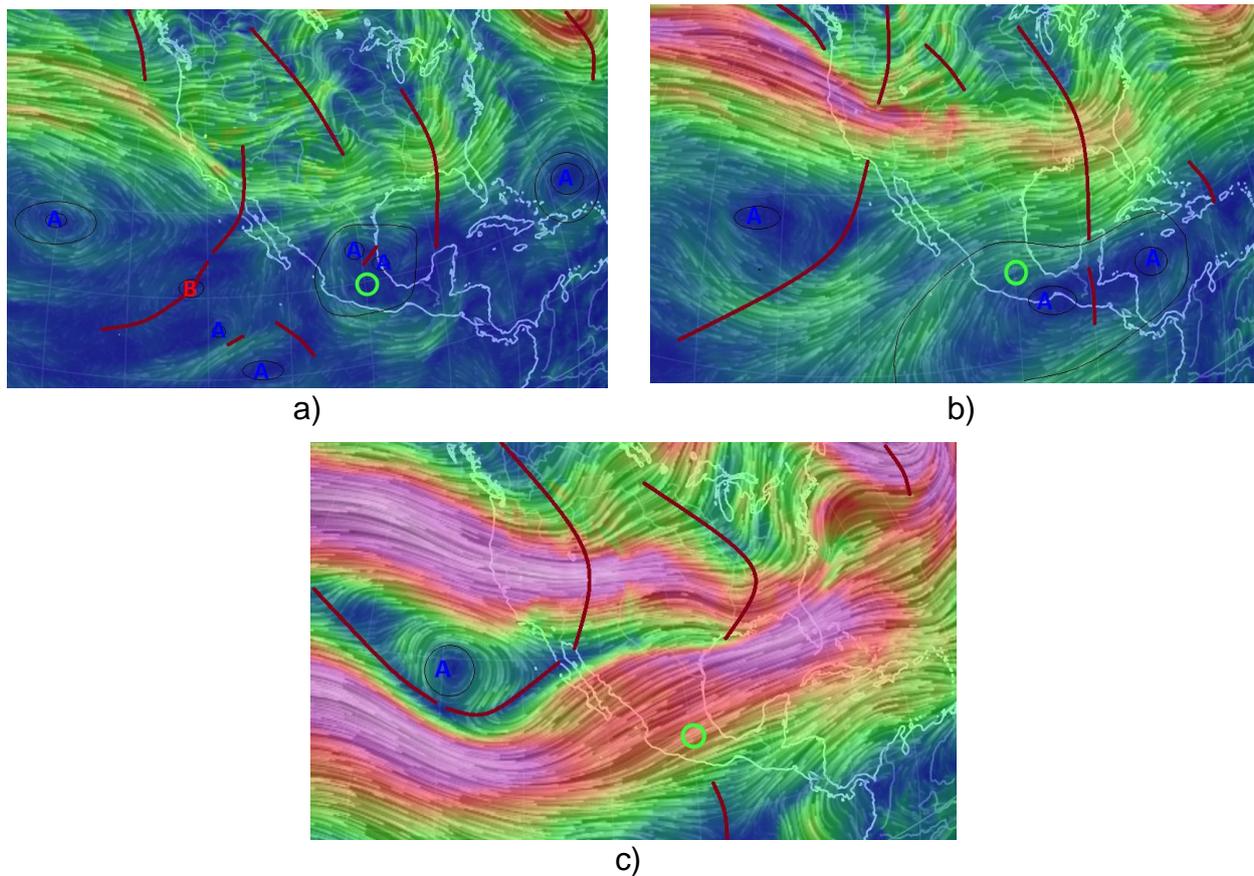


Figura 5.23 PSM4: Mapas de flujo del día 1 de marzo de 2016 a las 1800UTC para los niveles de presión de: a) 700 hPa, b) 500 hPa, c) 200 hPa.

Este patrón sinóptico induce en superficie un evento extremo de altas concentraciones de ozono en casi toda la Ciudad. Se reportan valores elevados simultáneamente en el N, el centro y el S de la Ciudad de México. El episodio se inicia a las 15 horas y aún a las 18 horas la estación CUA, en el W de la Ciudad medía valores de 208ppb. La gran debilidad de los vientos durante las horas de la tarde posibilitó el estancamiento de precursores. La temperatura máxima en promedio en la ZMCM no sobrepasó los 28 ° C.

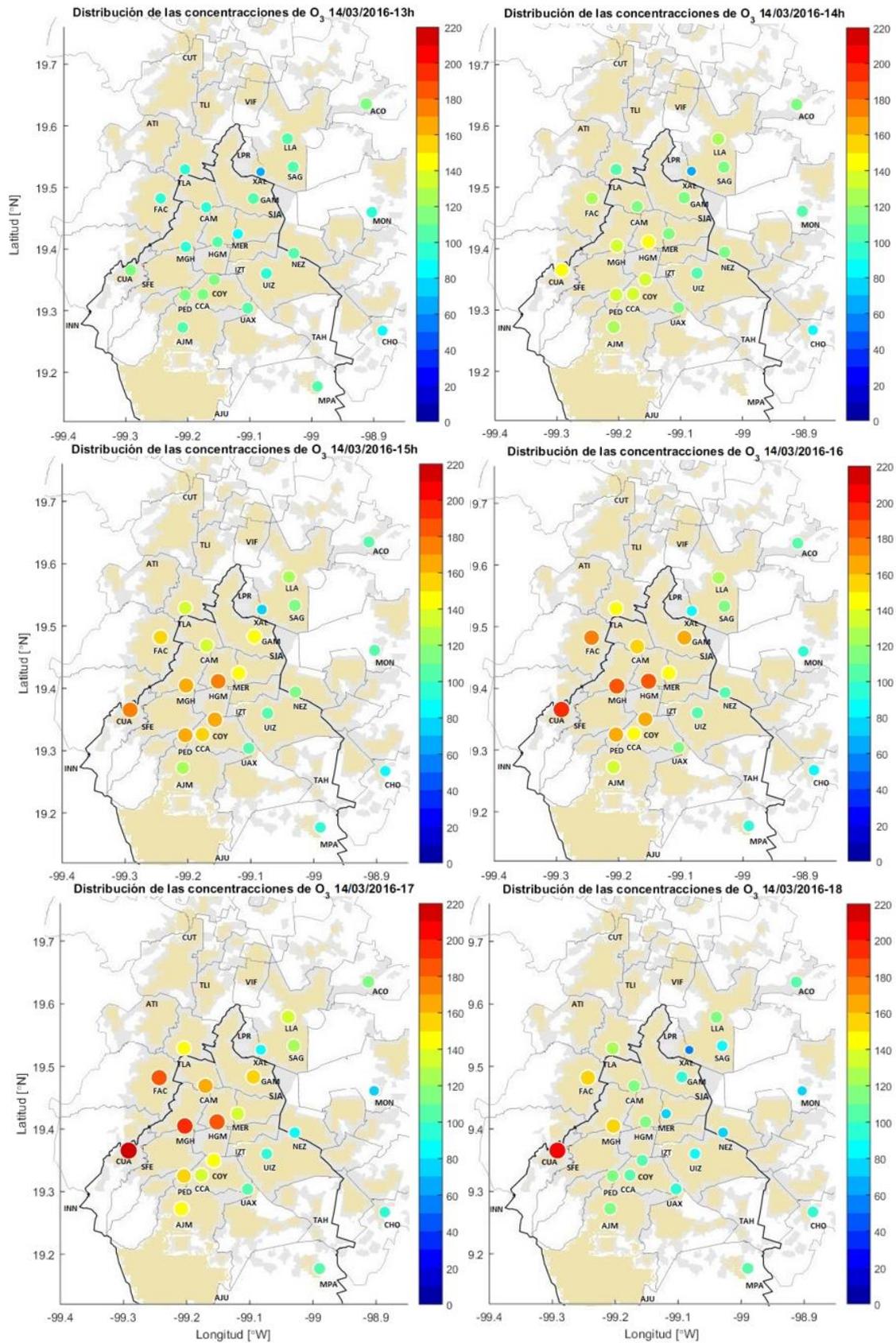


Figura 5.24 Concentraciones horarias de ozono medidas en las estaciones de la RAMA. La escala muestra los valores de concentración en ppb.

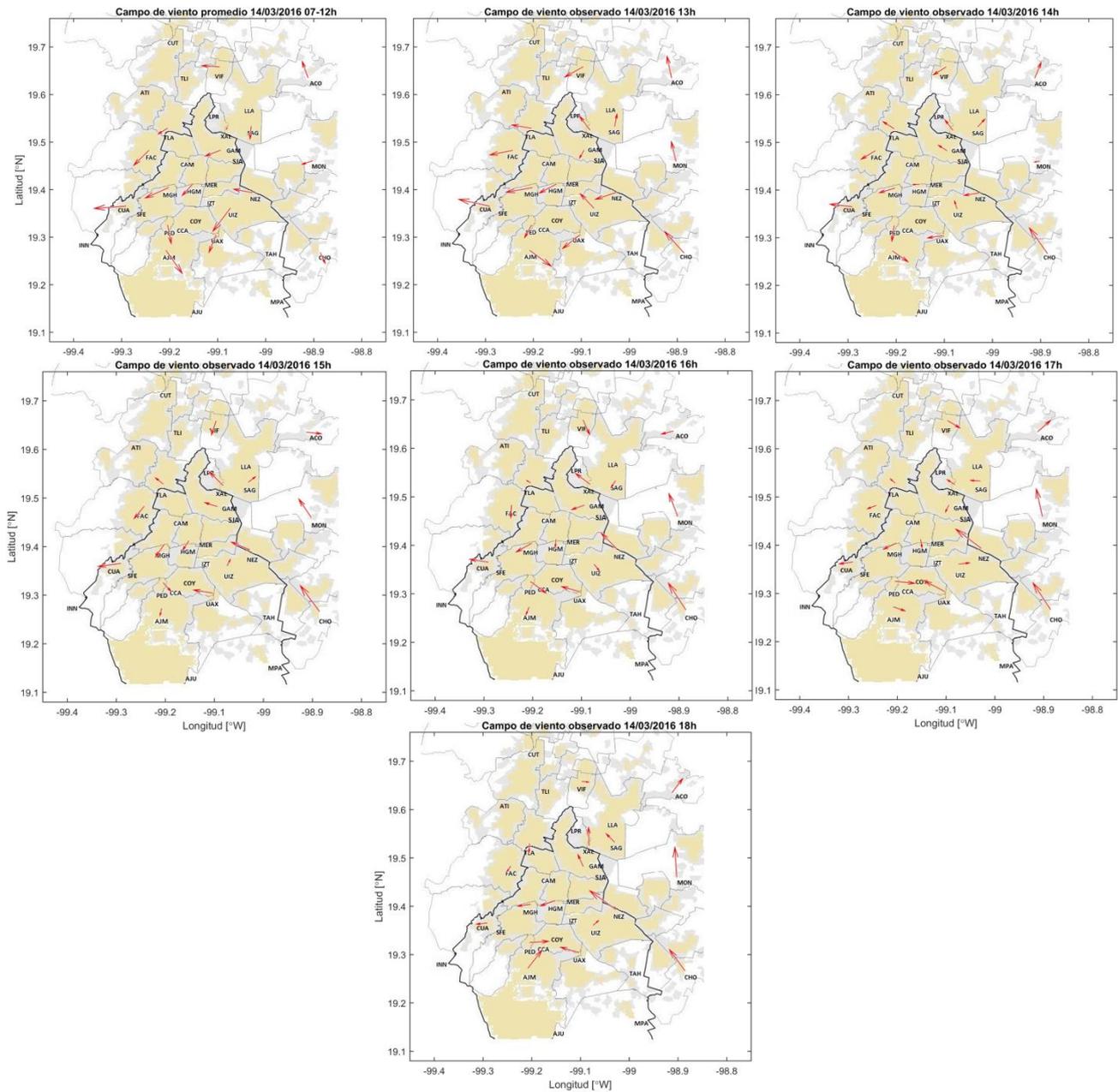


Figura 5.25 Campo de viento para las horas indicadas: promedio para la mañana (7-12 horas) en el caso de la primera imagen y en el resto se muestra valores observados de la velocidad y dirección del viento durante la hora indicada para cada estación. El tamaño del vector es proporcional a la magnitud de la velocidad del viento..

8. Vaguada en 700 hPa y anticiclón sobre el NW de México en 500hPa.

En la Fig. 5.26 en 700 hPa se observa un área de bajas presiones en el flujo del E sobre Oaxaca con una vaguada extendida al N hasta Ciudad de México, este sistema seguramente fue el responsable de la inversión de temperatura en superficie que ocurrió a las 12 UTC como lo evidencia el radiosondeo de esa hora, del 12 de junio de 2014

(Anexo 1); sobre el Norte de México una amplia celda de alto geopotencial posee dos centros uno sobre Sonora y otro al N de Nuevo León y Tamaulipas; dicho sistema anticiclónico se profundiza en la altura y en 500 hPa está representado por un único centro sobre los estados del NW de México e impone vientos del NE sobre los estados del centro del país, de ahí las dos capas de inversión que se observan en el radiosondeo sobre los 500 y 600 hPa respectivamente. En 250 hPa el anticiclón desciende al SO sobre el Pacífico de modo que

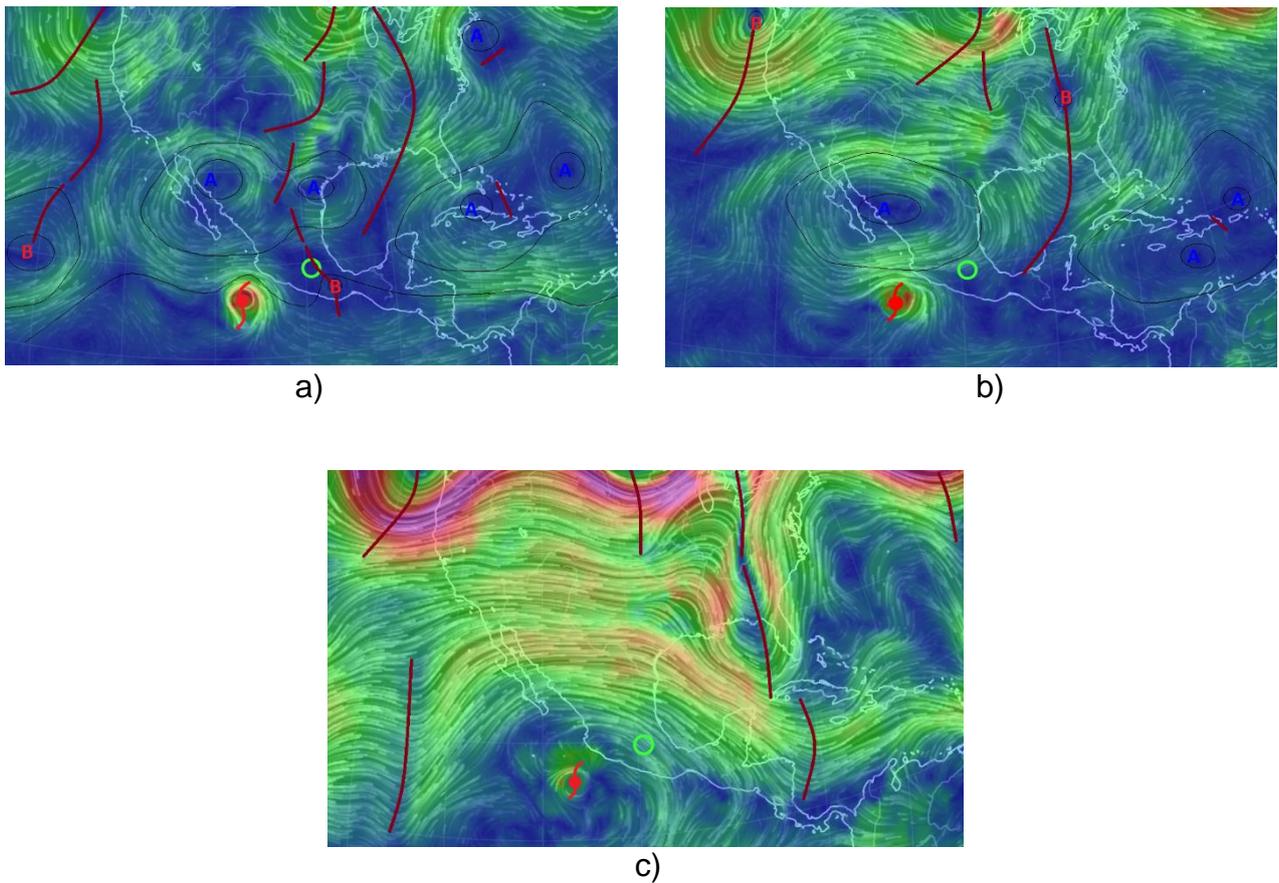


Figura 5.26 PSJ6: Mapas de flujo del día 12 de junio de 2014 a las 1800UTC para los niveles de:
a) 700 hPa, b) 500 hPa, c) 200 hPa.

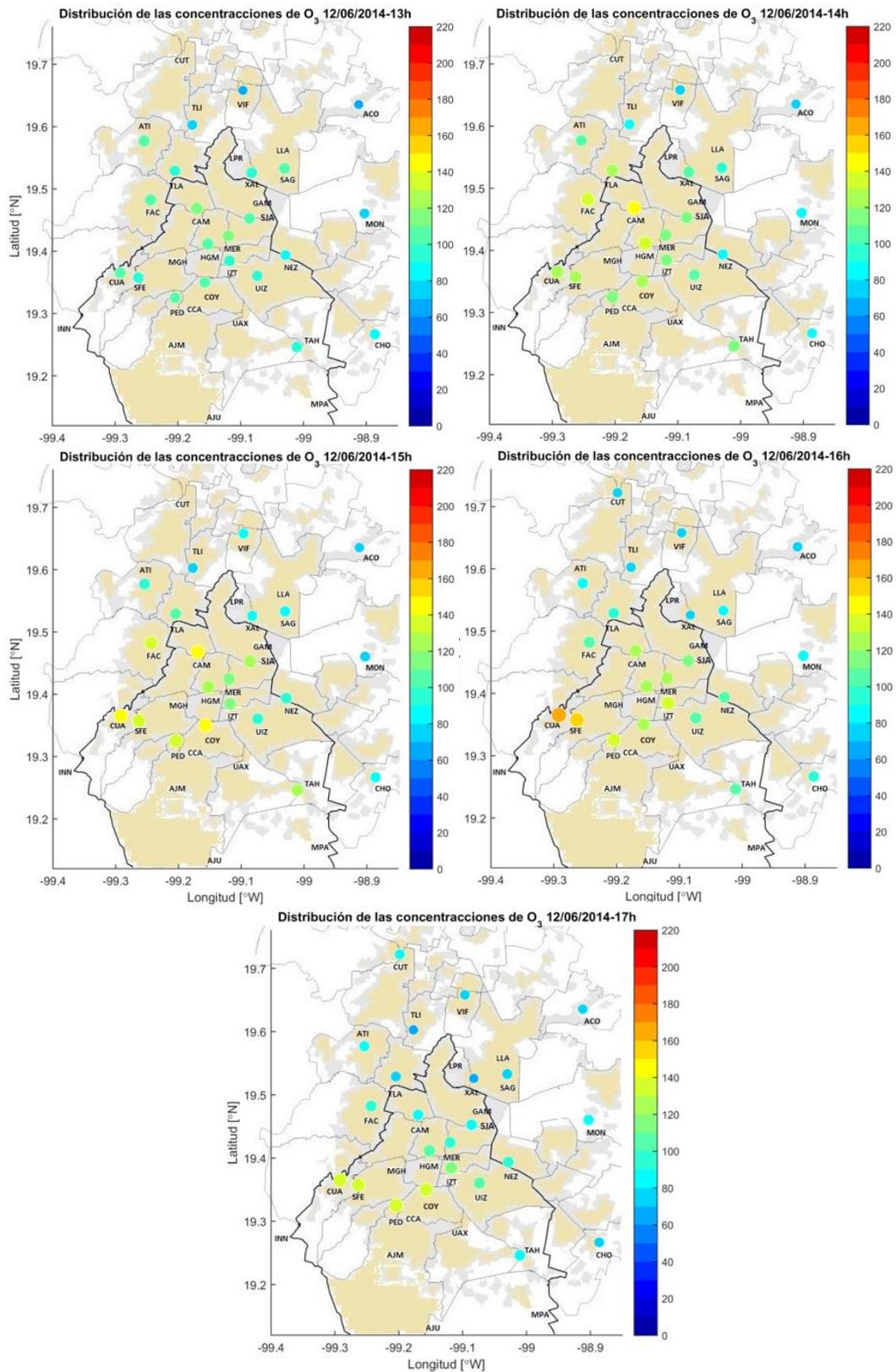


Figura 5.27 Concentraciones horarias de ozono medidas en las estaciones de la RAMA. La escala muestra los valores de concentración en ppb.

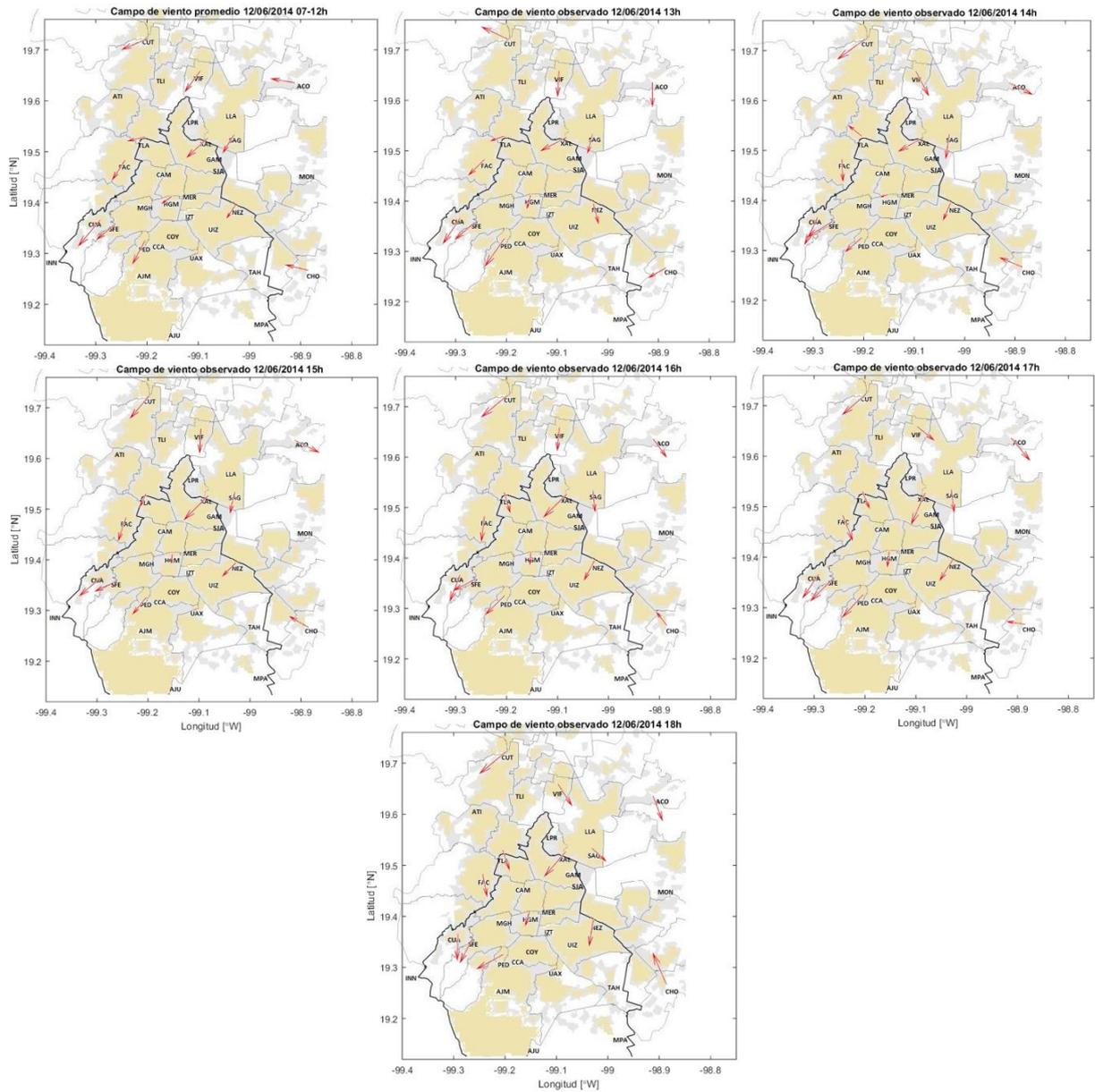


Figura 5.28 Campo de viento para las horas indicadas: promedio para la mañana (7-12 horas) en el caso de la primera imagen y en el resto se muestra valores observados de la velocidad y dirección del viento durante la hora indicada para cada estación. El tamaño del vector es proporcional a la magnitud de la velocidad del viento.

5.2 Análisis de un caso de estudio.

Para fortalecer las conclusiones del trabajo se realizó el análisis de un caso de estudio, para los días del 12 al 17 de marzo de 2016. La Figura 5.29 muestra los valores de las concentraciones en las estaciones activas en dicho periodo. El día 11 fue un día limpio con concentraciones que no sobrepasaron los 75ppb. Dicho día un centro de bajas presiones extratropicales se localizaba sobre Texas y el frente frío que la acompañaba se extendía hacia el S-SE sobre los estados de Nuevo León, Guanajuato, Michoacán, Colima y proseguía hacia el SE sobre aguas del Pacífico; la onda polar que generó el sistema frontal se presentaba semicerrada y ligeramente adelantada en los niveles de 500 y 250 hPa como es común en la altura. Sobre la porción trasera de la onda en niveles altos, fuerte convergencia del flujo influye sobre el centro y ZMCM, de modo que fuertes corrientes del NW, próximas a 91km/h se sobreponen.

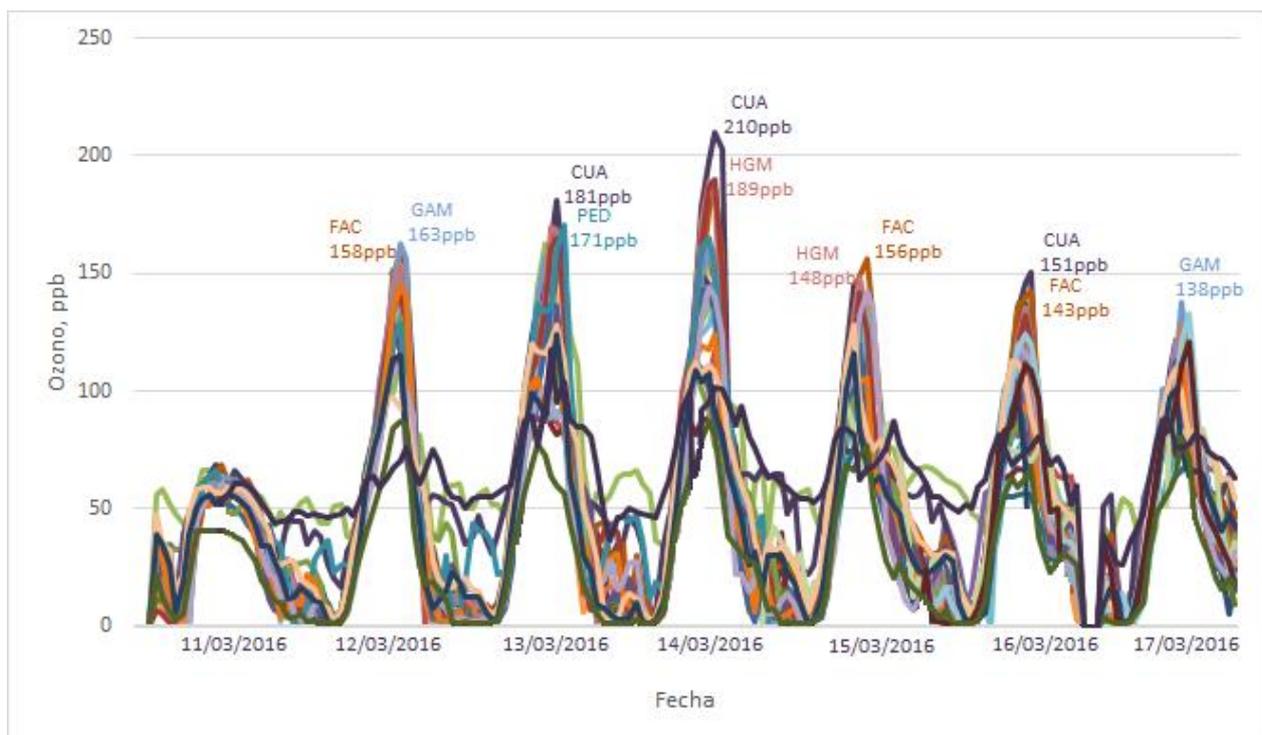


Figura 5. 29 Promedios horarios de las concentraciones de ozono para las estaciones activas, entre el 11 de marzo de 2016 y el 17 de marzo de 2016.

Como se observa en el perfil de velocidades del viento Figura 5.30, en los primeros 1000 m alcanzaron valores superiores a los 12m/s.

Ahora bien; el día 12 el frente frío se extendió hasta la Ciudad de México aunque muy debilitado en su porción S debido al avance hacia el E de la vaguada polar en la altura y la ruptura de la estructura vertical del sistema (este caso se explica con más detalles en el subcapítulo 5.1.2). La convergencia en la altura con un flujo de 105km/h estuvo generando divergencia del viento en la baja tropósfera; y puede decirse que esta situación es un caso atípico de intrusión de ozono estratosférico en la tropósfera en el que se alcanzaron valores de hasta 163 y 158 ppb en las estaciones GAM y FAC, respectivamente.

El día 13 se reportan concentraciones de hasta 181 ppb y 171 ppb en las estaciones CUA y PED, respectivamente. Ya para este día avanza la zona baroclínica y deja de influir sobre la parte central. Se imponen débiles centros anticiclónicos que se desplazan tras la misma en 700 hPa. Estos centros se localizan sobre Nueva California y otro sobre el Pacífico al S de 20 ° N; y generan débiles gradientes de flujo sobre los alrededores de la ZMCM. Como se muestra en la Figura 5.30 entre las 48 y 72 horas, las velocidades del viento en los primeros 1700m son inferiores a 5m/s. La presencia de un centro anticiclónico sobre el área de estudio en 500hPa provoca un efecto de tapón que no favorece los movimientos verticales por encima de este nivel y provoca estancamiento de contaminantes. Convergencia relativa en la alta tropósfera incentiva divergencia en superficie. En este caso tampoco puede descartarse la posible intrusión de ozono estratosférico debido a la posición de la onda de reemplazo que se ubica ligeramente al N de la región con similar ubicación en 500 y 250 hPa.

Los días 14,15 y 16 de marzo se observa una configuración sinóptica similar con un centro de alto geopotencial sobre la Ciudad de México en niveles bajos, una amplia celda anticiclónica en 500 hPa reforzando los movimientos subsidentes y sobre la región se sobrepone el ramal ascendente del chorro subtropical por lo que en la alta tropósfera predominan valores relativos de divergencia positiva (divergencia negativa=convergencia). Los valores máximos de ozono se reportaron el día 14 con 210 ppb en la estación CUA.

El día 17 continúa el centro de alto valor geopotencial en 700 hPa, pero en 500 hPa el sistema anticiclónico se desplaza hacia el SE dando paso a la rama ascendente de una vaguada polar, la misma se extiende desde un centro de bajo geopotencial localizado en

Nueva California e impone mayor gradiente en el flujo, alcanzándose valores de hasta 45 km/h sobre el área. En niveles altos el chorro subtropical en la rama ascendente de la onda polar impone velocidades de hasta 125 km/h. Bajo esta configuración evidentemente los valores de ozono disminuyen debido a la mayor ventilación de la cuenca que se favorece por los movimientos ascendentes que incentiva la divergencia positiva en niveles medios y altos.

Los días 12, 13, 14 y 15 de acuerdo al criterio aplicado (valores superiores a 154 ppb) fueron introducidos al algoritmo SOM. Se obtuvo que los días 12 y 13 de marzo se agruparon en C1, y los días 14 y 15 por C4. Estos resultados al inicio de la investigación se consideraron una deficiencia en el método, pero al analizar la configuración tanto en 700 hPa como en el resto de los niveles se constató que a pesar de ser días consecutivos la situación sinóptica asociada era diferente para cada par de días. Con este evento se constató la precisión de SOM para clasificar situaciones sinópticas diferentes sobre el área de estudio que influyeron sobre la región con una variación temporal inferior a 24 h.

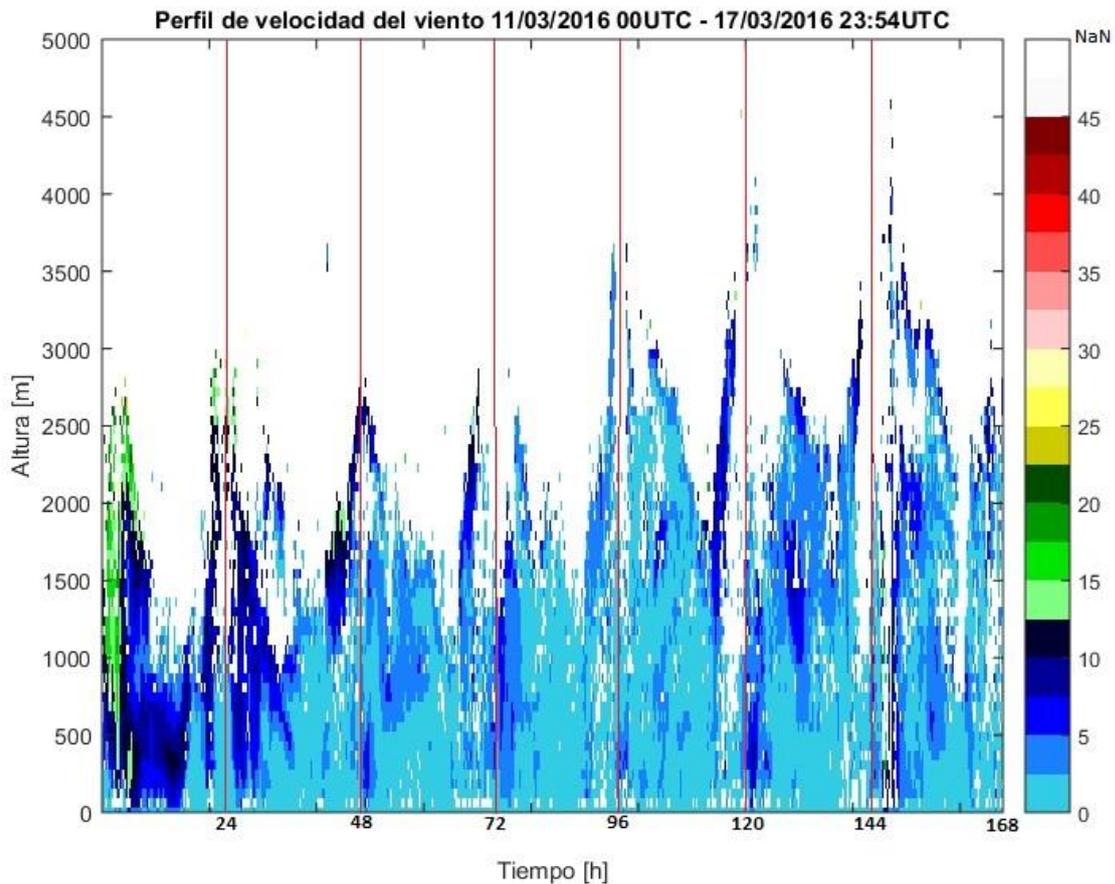


Figura 5. 30. Perfil de velocidades del viento en m/s de acuerdo a la escala.

5.3 Observaciones generales y ejercicio de pronóstico meteorológico y de calidad del aire.

Como parte del cumplimiento de los objetivos de la investigación se llevó a cabo paralelamente un ejercicio de pronóstico meteorológico y de calidad del aire para ganar experiencia en el área de estudio (mayo 2018) y luego para corroborar los resultados obtenidos (mayo-junio 2019). Dicho experimento se realizó en estrecha colaboración con el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT).

Se realizaron pronósticos para las próximas 24 a 48h, con actualizaciones cada 12 h de acuerdo a las salidas de las 00 y 12 UTC de los modelos globales GFS (Global Forecast System) para 22 km, ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) para 9 km y las salidas del modelo a mesoescala WRF (Weather Regional Forecast) con una resolución espacial de 1 km. Se consultó además para el pronóstico de concentraciones de ozono; las salidas del WRF acoplado a CMAQ y HERMES-Mex, con resolución de 1 km.

Otras herramientas empleadas fueron los datos del radiosondeo del Aeropuerto Internacional de México que se realizan diariamente a las 12UTC, con el fin de caracterizar el perfil vertical del viento, la estabilidad de la tropósfera, la humedad relativa y la ubicación de inversiones térmicas.

El ejercicio fue muy provechoso y permitió la corrección tanto por subestimaciones como sobreestimaciones del modelo de calidad del aire (WRF-CMAQ- HERMES-Mex) para las concentraciones del ozono en la ZMCM en más de una ocasión.

De acuerdo a lo planteado en la US EPA (1994) para identificar condiciones meteorológicas que favorecen la formación de ozono, dígame:

- $T \geq 30^{\circ}\text{C}$
- Velocidad del viento $\leq 5\text{m/s}$ (7:00 10:00)
- Velocidad del viento $\leq 7\text{m/s}$ (13:00 14:00)
- Humedad relativa $\leq 60\%$

Durante la investigación y el ejercicio de pronóstico fue posible verificar que efectivamente la velocidad del viento inferior a 5 m/s durante la mañana tanto en superficie como en la vertical son condiciones necesarias para que tenga lugar el estancamiento de contaminantes primarios con la consecuente formación de ozono; así mismo valores de humedad relativa inferiores al 60%. Sin embargo fue evidente que para temperaturas máximas inferiores a 25 ° C es recurrente sobrepasar valores de 120 ppb en la ZMCM; principalmente bajo la condición de cielo nublado, teniendo en cuenta las condiciones favorables antes descritas.

Un análisis de las temperaturas para el caso de estudio descrito en 5.2 como se muestra en la Figura 5.31 ratifica lo antes dicho. El día 12 de marzo de 2016 las temperaturas en el horario de las 12 a 17 horas (hora local) se mantuvieron entre 18 y 26 ° C, con una mediana de 23 ° C. Así mismo un análisis de las temperaturas en las estaciones de la cuenca para los 308 días del estudio, arrojó los resultados mostrados en el Figura 5.32.

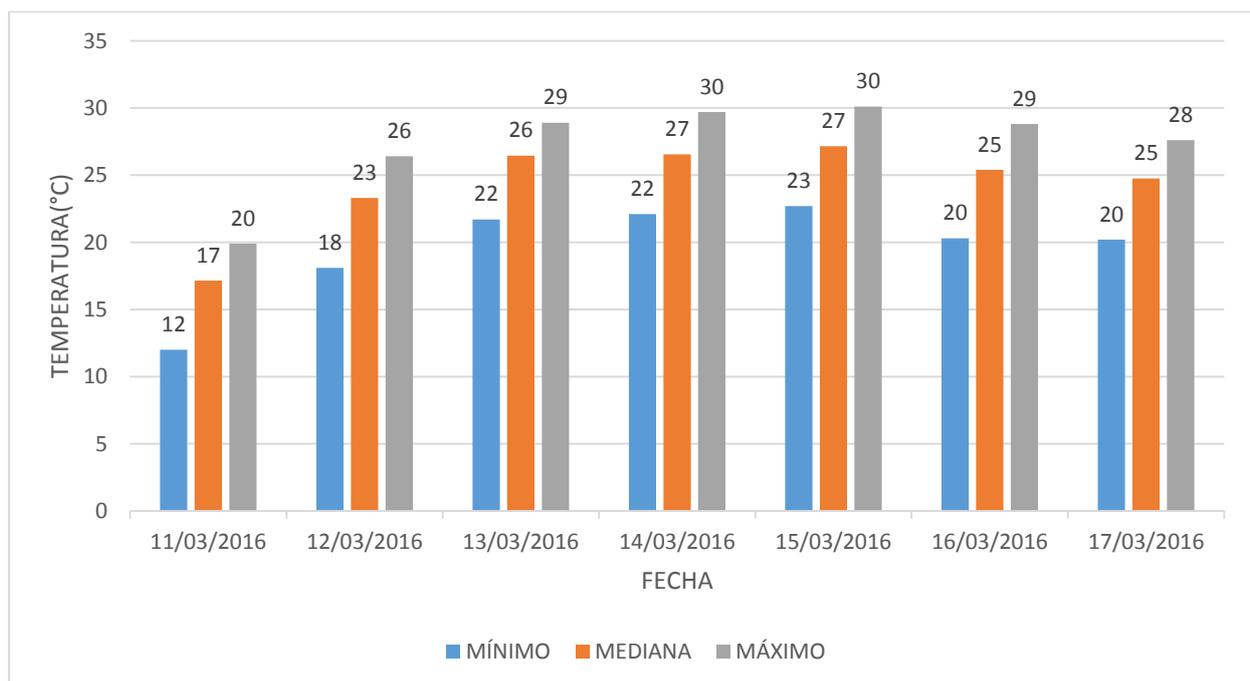


Figura 5. 31. Comportamiento de los estadígrafos mínimo, máximo y mediana en todas las estaciones de monitoreo activas, para los días del 11 al 17 de marzo de 2016.

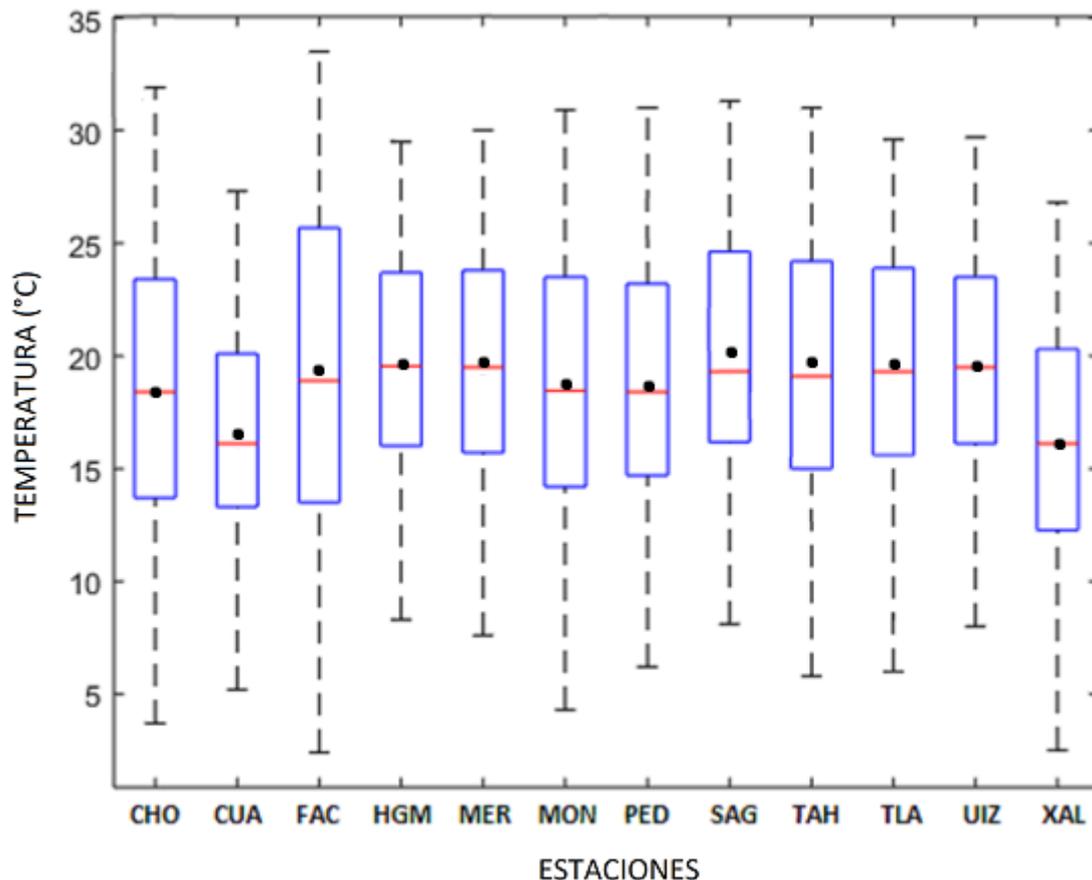


Figura 5. 32 Comportamiento de la temperatura para cada estación de monitoreo, 2003-2016 (de acuerdo a la suficiencia del 75% de los datos). Los puntos negros representan la media de los datos y la línea roja a la mediana.

La Figura 5.32 nos da una idea que para los días con máximos valores de ozono la temperatura en las estaciones de monitoreo presenta una tendencia a la simetría en la mayoría de las estaciones analizadas (segundo cuartil = media aritmética) o una ligera tendencia a la asimetría positiva (media aritmética > segundo cuartil). Una asimetría positiva indica la presencia de valores elevados, superiores a la mediana, pero poco frecuentes.

5.4 Estrategias para la prevención, minimización y control de contingencias atmosféricas por ozono.

Con la realización de este trabajo se evidenció que aun conociendo mejor las condiciones a escala sinóptica y a mesoescala que tienen lugar durante las contingencias ambientales por ozono troposférico, si bien es posible mejorar los pronósticos a corto plazo de las concentraciones para prevenir a la población; el camino para la minimización y control del

problema debe focalizarse en la reducción de emisiones de precursores de dicho contaminante. Por ello es necesario continuar implementando políticas y estrategias efectivas o replantearse las ya existentes.

Con el objetivo de proponer algunas medidas de prevención, minimización y control de las contingencias ambientales por ozono, como parte de esta investigación se procedió a realizar una detallada revisión bibliográfica, tratando de consultar lo más actualizado y novedoso sobre el tema tanto nacional como internacionalmente.

- Se requiere como primer paso hacer una revisión y evaluación de las acciones aplicadas, así como determinar con base en conocimiento científico y técnico las acciones que deben modificarse e implementarse, además se requiere definir líneas estratégicas que puedan ser viables en el corto y mediano plazo, con la finalidad de reducir el riesgo a la salud de la población y el daño a los ecosistemas.
- Se impone la necesidad de aumentar la red de precursores de ozono para conocer de igual manera si ha cambiado en los últimos años la fotoquímica dentro de la Ciudad. Si bien numerosos estudios han demostrado la sensibilidad de la atmósfera de la Ciudad de México a COV; el crecimiento apresurado de la Ciudad con la urbanización, el incremento desmedido del parque vehicular, favorecido incluso por medidas como “El no circula”; son fenómenos económico-sociales que pueden generar cambios sustanciales en aspectos de la Meteorología y la fotoquímica local; además de su respuesta a la Meteorología Sinóptica.
- Establecer incentivos para la introducción de vehículos de baja emisión, como los automóviles eléctricos e híbridos, así como las motocicletas eléctricas.
- Iniciar la recopilación de datos de actividad para las fuentes de emisión diferenciando para fines de semana y días festivos.
- Reducir las emisiones de COV en las industrias de la CDMX y del EDOMEX.

- Limitar el consumo de pinturas base solvente; revisar y actualizar las normas para regular el contenido de COV en insumos industriales y domésticos.
- Revisar los criterios para la aplicación de los programas Hoy no Circula (HNC) y de Verificación Vehicular Obligatoria (VVO) para no solo incluir las emisiones de contaminantes de las diferentes clases de vehículos, sino también las posibles diferencias en los usos de los diferentes modos de transporte (kilómetros recorridos, distribución temporal de los viajes, etc.). Actualmente la edad promedio de los autos a gasolina en la CDMX es de 6.5.
- Evaluar la posible modificación de los programas HNC y VVO para promover el uso de nuevas tecnologías y de vehículos más limpios y eficientes, para acelerar la introducción de normas de emisiones más estrictas para vehículos nuevos.
- Investigar por medio de campañas de mediciones continuas la sensibilidad del ozono al COV y NOx en la ZMVM y si pudo haber tenido cambios en los últimos años. Una nueva campaña de campo enfocada e intensiva también ayudaría a comprender los cambios en la atmósfera química de la ZMVM y asegurar que los modelos proporcionen información confiable sobre las estrategias de regulación propuestas.
- Establecer corredores de transporte que utilicen la periferia de la ciudad.
- Implementar la conducción eficiente, esta es una práctica que, aprovechando sólo un cambio de hábitos y sin requerir inversiones en equipamientos, permite reducir el consumo de combustible y aprovechar mejor lo que se consume. En este sentido, la conducción eficiente permite ahorrar de un 10% a un 25% del carburante y reducir considerablemente las emisiones de contaminantes en la ciudad.
- Mejorar el rendimiento de los sistemas de pronóstico de la calidad del aire utilizando inventarios de emisiones y datos ambientales actualizados.

- Realizar paros en el sector energético-industrial cuando las condiciones meteorológicas sean desfavorables para la dispersión de contaminantes primarios, teniendo en cuenta las menores pérdidas económicas.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones.

- El método de agrupamiento SOM aplicado a los valores de altura de geopotencial en 700 hPa facilitó la clasificación de las situaciones sinópticas asociadas a los eventos de altas concentraciones de ozono; asimismo permitió el análisis de la transición de una situación a otra.

- Se concluyó que un total de 8 situaciones sinópticas son favorables para desatar episodios de ozono troposférico en la ZMCM, entre los meses de febrero a junio. La ocurrencia de inversiones térmicas en la baja y media tropósfera fue mayor bajo la presencia de los patrones sinópticos: *Onda corta en 500hPa; Vaguada en 700 hPa y anticiclón sobre el NW de México en 500hPa.*

- No se pudo asociar un patrón en el comportamiento de las variables a mesoescala para cada una de las situaciones sinópticas encontradas; pero se pudo concluir que:
 - ✓ Las variables velocidad y dirección del viento a nivel de superficie determinaron en gran medida la localización de los episodios.
 - ✓ Se corroboró que para valores de temperaturas máximas con una mediana de 23° C es posible que ocurran disparos de las concentraciones de ozono siempre que estén presentes el resto de las condiciones favorables.
 - ✓ La debilidad de la velocidad del viento en los primeros 2 km de altura determinó en gran medida que se alcanzaran picos de ozono; en días menos contaminados el perfil vertical del viento mostró velocidades superiores a los 7m/s hasta dicha altura.

- Fue posible a través de la experiencia adquirida en la elaboración del trabajo y con la aplicación de los resultados, corregir tanto subestimaciones como sobreestimaciones del modelo acoplado WRF-CMAQ- HERMES-Mex.

- Fue posible proponer medidas de prevención, minimización y control para precursores de ozono.

6.2 Recomendaciones.

- Comparar los resultados obtenidos por el método SOM, con otros métodos de detección de patrones sinópticos, con el fin de disminuir las deficiencias encontradas y obtener una mejor aproximación a las situaciones sinópticas encontradas con los patrones.
- Avanzar en el conocimiento de las situaciones sinópticas a través de corridas de modelos acoplados fotoquímico-meteorológicos para mejor comprensión de los resultados.
- Validar el comportamiento de las situaciones sinópticas encontradas con datos de reanálisis de mayor resolución y además con modelos atmosféricos regionales basados en el reanálisis sobre la región de estudio.
- Debe incrementarse el número de estaciones de la red de precursores de ozono, así como las mediciones de las variables meteorológicas en las mismas para poder mejorar los resultados obtenidos.
- Aplicar los resultados de esta investigación en los pronósticos diarios que se realizan para la ZMCM, en aras de validar la investigación y lograr mayor eficiencia en el pronóstico.

CAPITULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amador, J. A climatic feature of tropical Americas: The trade wind easterly jet. Disponible en: <http://www.imn.ac.cr/publicaciones/index.html>, (1998).
- Alonso, A. (2013). "Estudio de algunos factores meteorológicos que influyen en la dispersión de la contaminación atmosférica en La Habana". Tesis de Licenciatura. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC). Cuba.
- Bardossy, A., Stehlik, J., y Caspary, H.-J. (2002). Automated objective classification of daily circulation patterns for precipitation and temperature downscaling based on optimized fuzzy rules. *Climate Research*, 23(1), 11-22.
- Barnston, A. G., y Livezey, R. E. Classification, Seasonality and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns. *Monthly Weather Review* 115 (1987).
- Barry, R. G., y Carleton, A. M. (2001). *Synoptic and dynamic climatology*. Psychology Press. Serrano, 2007.
- Barry, R. G., y Perry, A. H. (1973). *Synoptic climatology; methods and applications*. Routledge Kegan & Paul.
- Blair, D. (1998). The kirchhofer technique of synoptic typing revisited. *International journal of climatology*, 18(14), 1625-1635.
- Bravo, A.H., R. Magaña Z., A.C. Lowe, S. Ayanegui J., E. Sigler A. (1978). "Preliminary Study of the Photochemical Process in the Air Pollution of Mexico City". In: *Proceedings of the International Clean Air Conference*. The Clean Air Society of Australia and New Zealand. Brisbane, Australia. May 15-19. pp. 183-191
- Coggins, J. H., McDonald, A. J., y Jolly, B. (2014). Synoptic climatology of the ross ice shelf and ross sea region of antarctica: k-means clustering and validation. *International journal of climatology*, 34 (7), 2330-2348.
- De Foy, B., Caetano, E., Magana, V., Zitácuaro, A., Cárdenas, B., Retama, A.,... Molina, M. (2005). Mexico city basin wind circulation during the mcma-2003 field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 5(3), 2503-2558.
- 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. and Molina, L. T. (2008): Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis. Published in *Atmos. Chem. Phys.*

- Deligiorgi, D., Philippopoulos, K., Kouroupetroglou, G. (2014): An Assessment of Self-Organizing Maps and k-means Clustering Approaches for Atmospheric Circulation Classification. ResearchGate.
- Demuzere, M., Kassomenos, P., y Philipp, A. (2011). The cost733 circulation type classification software: an example for surface ozone concentrations in central europe. *Theoretical and applied climatology*, 105(1-2), 143-166.
- Díaz-Esteban, Y., y Raga, G. B. (2018). Weather regimes associated with summer rainfall variability over southern Mexico. *International Journal of Climatology*, 38(1), 169–186.
- Fariñas, E. P., y Pedroso, C. G. (2011). Climatología sinóptica de las bajas extratropicales que influyen en el archipiélago cubano. *Revista Cubana de Meteorología*, 17(2), 71-86.
- Fernández, A., y Díaz, Y. (2005). Catálogo de procesos sinópticos del archipiélago cubano en el periodo 1979-1993. Centro Meteorológico Provincial de Cienfuegos, Cuba.
- Fiddes, S., Pezza, A., Mitchell, T., Kozyniak, K., y Mills, D. (2016). Synoptic weather evolution and climate drivers associated with winter air pollution in new zealand. *Atmospheric Pollution Research*, 7(6), 1082-1089.
- Frakes, B., y Yarnal, B. (1997). A procedure for blending manual and correlation-based synoptic classifications. *International Journal of climatology*, 17(13), 1381-1396.
- García-Yee, J.S., R. Torres-Jardón, H. Barrera-Huertas, T. Castro, O. Peralta, M. García, W. Gutiérrez, M. Robles, A. Torres-Jaramillo, A. Ortínez, Ruiz-Suárez, L.G., 2016. Characterization of NOx-Ox relationships during daytime exchange of air masses over a mountain pass in the Mexico City Megalopolis. *Atmos.*
- Ghil. M., M. R. Allen., M. D. Dettinger., K. Ide., D. Kondrashov., M. E. Mann., A. W. Robertson., A. Saunders., Y. Tian., F. Varadi., P. Yiou. (2002): Advanced spectral methods for climatic time series. *Reviews of Geophysics*.
- Gibson, P. B., y Cullen, N. J. (2015). Synoptic and sub-synoptic circulation effects on wind resource variability{a case study from a coastal terrain setting in new zealand. *Renewable Energy*, 78, 253-263.
- Gutiérrez Quevedo, E., Varga, C. I., y Fernández, A. (2008). Procesos sinópticos objetivos extremos de la estación lluviosa venezolana en los periodos 1956-1977 y 1978-1999. *Terra Nueva Etapa*, 24 (35)

- Gutiérrez Quevedo, E., Varga, C. I., y Fernández, A. (2008). Procesos sinópticos objetivos extremos de la estación lluviosa venezolana en los periodos 1956-1977 y 1978-1999. *Terra Nueva Etapa*, 24 (35).
- Hannachi, A., Jolliffe, I., y Stephenson, D. Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review. *International Journal of Climatology* 27 (2007), 1119–1152.
- Heywood, G. S. P. (1953). Surface pressure-patterns and weather around the year in hong kong. Government Printer, South Africa.
- Huth, R. (2000). A circulation classification scheme applicable in gcm studies. *Theoretical and applied climatology*, 67 (1-2), 1-18.
- Huth, R., Beck, C., Philipp, A., Demuzere, M., Ustrnul, Z., Cahynov´a, M., . . . Tveito, O. E. (2008). Classifications of atmospheric circulation patterns. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146 (1), 105-152.
- J. Garfias; R. González (1992): Air Quality in Mexico City. Subsecretaría de Ecología, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, Río Elba 20, México, D.F., CP 06500, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de Ciudad Universitaria, México, D.F., CP 04510.
- Jáuregui, E. (1988b), Local wind and air pollution interaction in the Mexico Basin, *Atmósfera*, 1, pp. 131–140.
- Jáuregui, E., Luyando, E. (1999): Global radiation attenuation by air pollution and its effects on the thermal climate in Mexico City. *International Journal of Climatology* 19(6):683 - 694
- Jazcilevich, A., Garcia, A., Ruiz-Suarez, L., 2003. A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the Central Region of Mexico. *Atmospheric Environment* 37, 183-193.
- Jenkinson, A., y Collison, F. (1977). An initial climatology of gales over the north sea. *Synoptic climatology branch memorandum*, 62, 18.
- Jenkinson, A., y Collison, F. (1977). An initial climatology of gales over the north sea. *Synoptic climatology branch memorandum*, 62, 18.
- Jiang, N., Cheung, K., Luo, K., Beggs, P. J., y Zhou, W. (2012). On two different objective procedures for classifying synoptic weather types over east australia. *International Journal of Climatology*, 32(10), 1475-1494.

- Johonson, S. B. Feldstein, and B. Tremblay, 2008: The continuum of Northern Hemisphere teleconnection patterns and a description of the NAO shift with the use of selforganizing maps. *J. Climate*, 21, 6354–6371.
- Kageyama, M., Andrea, F., Ramstein, G., Valdes, P. J., Vautard, R. Weather regimes in past climate atmospheric general circulation model simulations. *Climate Dynamics* 15 (1999), 773–793.
- Kalkstein, L. S., y Corrigan, P. (1986). A synoptic climatological approach for geographical analysis: assessment of sulfur dioxide concentrations. *Annals of the Association of American Geographers*, 76(3), 381-395.
- Kalkstein, L. S., y Corrigan, P. (1986). A synoptic climatological approach for geographical analysis: assessment of sulfur dioxide concentrations. *Annals of the Association of American Geographers*, 76(3), 381-395.
- Kirchhofer, W. (1974). Classification of european 500 mb patterns. Swiss Meteorological Institute. Mckendry, 1994
- Kohonen, T. (2001). Self-organizing maps, vol. 30 of springer series in information sciences. ed: Springer Berlin. B´ardossy et al., 2002
- Kohonen, T. Self-Organizing Maps. Springer Series in Information Sciences 30 (1995), 362pp.
- Kutzbach, J. E. Empirical Eigenvectors of Sea-Level Pressure, Surface Temperature and Pre- cipitation Complexes over Noth America. *Journal of Applied Meteorology* 6 (1967), 791–802.
- Lamb, H. (1972). British isles weather types and a register of daily sequence of circulation patterns. geophys mem 116. HMSO, London. Kirchhofer, W. (1974). Classification of european 500 mb patterns. Swiss Meteorological Institute.
- Lee, C. C., y Sheridan, S. C. (2012). A six-step approach to developing future synoptic classifications based on gcm output. *International Journal of Climatology*, 32(12), 1792-1802.
- Leighton, R. M., y Spark, E. (1997). Relationship between synoptic climatology and pollution events in sydney. *International Journal of Biometeorology*, 41(2), 76-89.
- Liu, Y., y Weisberg, R. H. Self Organizing Maps - Applications and Novel Algorithm Design. Dr Josphat Igadwa Mwasiagi (Ed), (2011), ch. A Review of Self-Organizing Map Applications in Meteorology and Oceanography.

- Markle, B., Bertler, N., Sinclair, K., y Sneed, S. (2012). Synoptic variability in the ross sea region, antarctica, as seen from back-trajectory modeling and ice core analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117 (D2).
- Maunder, W. (1968). Synoptic weather patterns in the pacific northwest. *Northwest Science*, 42 (2), 80-88.
- Mckendry, I. G. (1994). Synoptic circulation and summertime ground-level ozone concentrations at vancouver, british columbia. *Journal of applied meteorology*, 33 (5), 627-641.
- Michaelides, S., Pattichis, C., y Kleovoulou, G. Classification of rainfall variability by using artificial neural networks. *International Journal of Climatology* 21 (2001), 1401–1414
- Michaelides, S., Tymvios, F., y Charalambous, D. (2010). Investigation of trends in synoptic patterns over europe with artificial neural networks. *Advances in Geosciences*, 23,107-112.
- Michelangeli, P.-A., R. Vautard, and B. Legras, 1995: Weather regimes: Recurrence and quasi stationarity. *J. Atmos. Sci.*, 52, 1237–1256.
- Mo, K., and M. Ghil, 1988: Cluster analysis of multiple planetary flow regimes. *J. Geophys. Res.*, 93, 10 927–10 952.
- Molina, L. T., Kolb, C. E., de Foy, B., Lamb, B. K., Brune, W. H., Jimenez, J. L., Ramos-Villegas, R., Sarmiento, J., Paramo-Figueroa, V. H., Cardenas, B., Gutierrez-Avedoy, V., and Molina, M. J., 2007. Air quality in North America's most populous city – overview of the MCMA-2003 campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2447-2473.
- 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., and Zavala, M. (2010) An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 8697-8760.
- Moore, R., y McKendry, I. (1996). Spring snowpack anomaly patterns and winter climatic variability, british columbia, canada. *Water Resources Research*, 32 (3), 623-632.
- National Air Pollution Control Administration. Air Quality Criteria for Photochemical Oxidants (NAPCA No. AP-63). Durham, North Carolina, March 1970.
- National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). *The Climate Data Guide: Empirical Orthogonal Function (EOF) Analysis and Rotated EOF Analysis*. Disponible en

<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data-tools-and-analysis/empirical-orthogonal-function-eof-analysis-and-rotated-eof-analysis>.

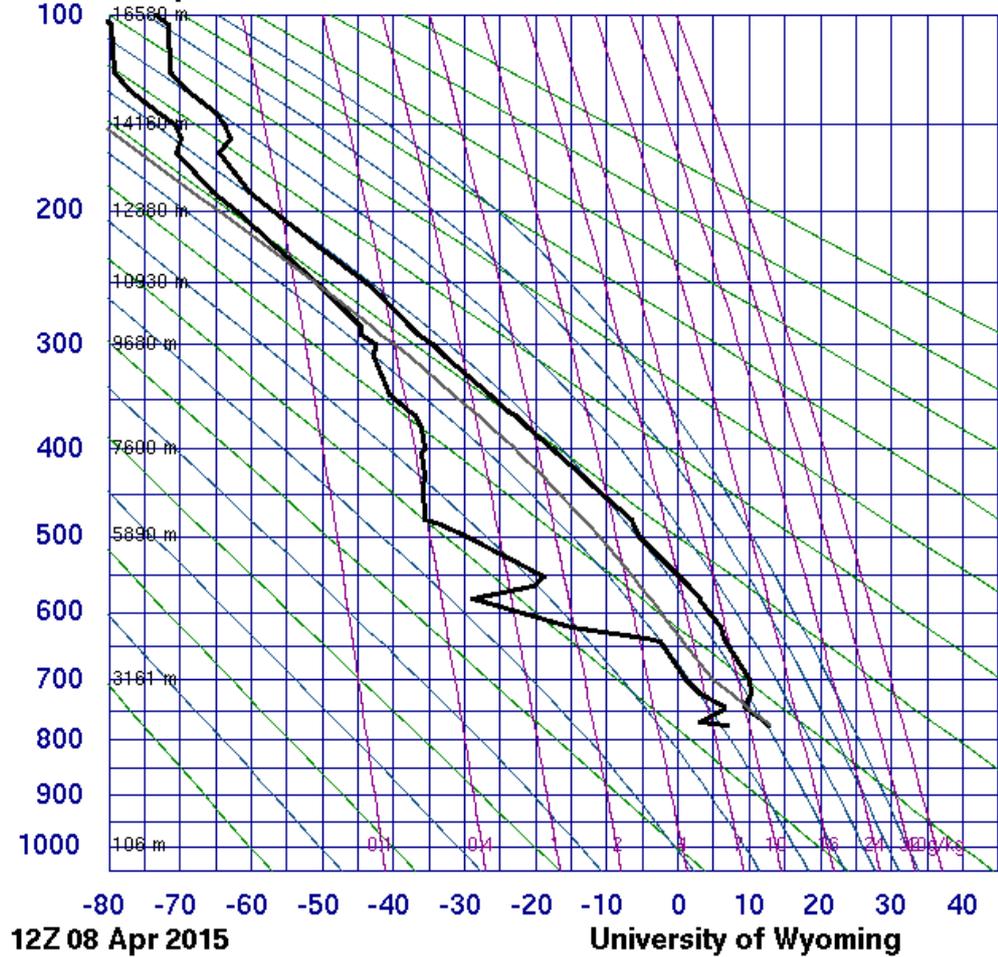
- Nowotarski, C. J., y Jensen, A. A. (2013). Classifying proximity soundings with selforganizing maps toward improving supercell and tornado forecasting. *Weather and Forecasting*, 28(3), 783-801.
- Oke, T. R., G. Zeuner y E. Jáuregui (1992), "The surface energy balance in Mexico City", *Atmos. Environment*.
- Philippopoulos, K., y Deligiorgi, D. (2012). A self-organizing maps multivariate spatiotemporal approach for the classification of atmospheric conditions. En *International conference on neural information processing* (pp. 544-551).
- Polo, I., A. Ullmann, P. Roucou, and B. Fontaine (2011): Weather regimes in the Euro-Atlantic and Mediterranean sector and relationship with West African rainfall over the period 1989–2008 from a self-organizing maps approach, *J. Clim.*
- Rojas, M., Li, L., Kanakidou, M., Hatzianastassiou, N., G., S., Le, T. H. (2013): Winter weather regimes over the Mediterranean region: their role for the regional climate and projected changes in the twenty-first century. *Climate Dynamics*.
- Sánchez, L. M. A. (1976). Climatología dinámica, sinóptica o sintética. Origen y desarrollo. *Revista de geografía*, 10 (1), 140-157.
- Seim, A., Schultz, J. A., Leland, C., Davi, N., Byambasuren, O., Liang, E.,Pederson, N. (2017). Synoptic-scale circulation patterns during summer derived from tree rings in mid-latitude asia. *Climate Dynamics*, 49 (5-6), 1917-1931.
- Shahgedanova, M., y Lamakin, M. (2005). Trends in aerosol optical depth in the russian arctic and their links with synoptic climatology. *Science of the total environment*, 341 (1- 3), 133-148.
- Sheridan, S. C., y Lee, C. C. The Self-Organizing Map in synoptic climatological research. *Progress in Physical Geography* 35, 1 (2011), 109–119.
- Sinclair, K., Bertler, N., y Trompeter, W. (2010). Synoptic controls on precipitation pathways and snow delivery to high-accumulation ice core sites in the ross sea region, antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115 (D22).
- Skinner, W. R., Flannigan, M. D., Stocks, B. J., Martell, D. L., Wotton, B. M., Todd, J. B., Bosch, E. M. (2002). A 500 hpa synoptic wildland fire climatology for large Canadian forest fires, 1959{1996. *Theoretical and Applied Climatology*, 71(3-4), 157-169.

- Souri, A. H., Choi, Y., Li, X., Kotsakis, A., y Jiang, X. (2016). A 15-year climatology of wind pattern impacts on surface ozone in houston, texas. *Atmospheric Research*, 174, 124-134.
- Stahl, K., Moore, R. D., y Mckendry, I. G. (2006). The role of synoptic-scale circulation in the linkage between large-scale ocean atmosphere indices and winter surface climate in british columbia, canada. *International Journal of Climatology*, 26(4), 541-560. Fiddes et al., 2016
- Streit, G.E., & F. Guzmán, (1996) Mexico City air quality: Progress of an international collaborative project to define air quality management options. *Atmos. Environ.* 30, 723-733.
- Tanner, P. A. (1999). Relationships between rainwater composition and synoptic weather systems deduced from measurement and analysis of hong kong daily rainwater data. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 33(3), 219-240.
- Tanner, P. A., y Law, P.-T. (2002). Effects of synoptic weather systems upon the air quality in an asian megacity. *Water, Air, and Soil Pollution*, 136(1-4), 105-124.
- Theobald, A., McGowan, H., Speirs, J., y Callow, N. (2015). A synoptic classification of inflow-generating precipitation in the snowy mountains, australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(8), 1713-1732.
- Van den Dool, H. M., Saha, S., y Johansson, A. Empirical Orthogonal Teleconnections. *Journal of Climate* 13 (2000), 1431–1435.
- Wallace, J. M., y Gutzler, D. S. Teleconections in the Geopotential Height Field during the Northern Hemisphere Winter. *Monthly Weather Review* 109 (1981), 784–812.
- Williams, W. Brand., Cuvelier, M.E., Berset, C. (1995): Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity.
- Yarnal, B. (1984). A procedure for the classification of synoptic weather maps from gridded atmospheric pressure surface data. *Computers & Geosciences*, 10 (4), 397-410.
- Yarnal, B. (1993). *Synoptic climatology in environmental analysis: a primer*. Belhaven.

ANEXOS

AI: Radiosondeo 08 de abril de 2015, 12UTC.

76679 Aerop. Intl Mexico, D.F.

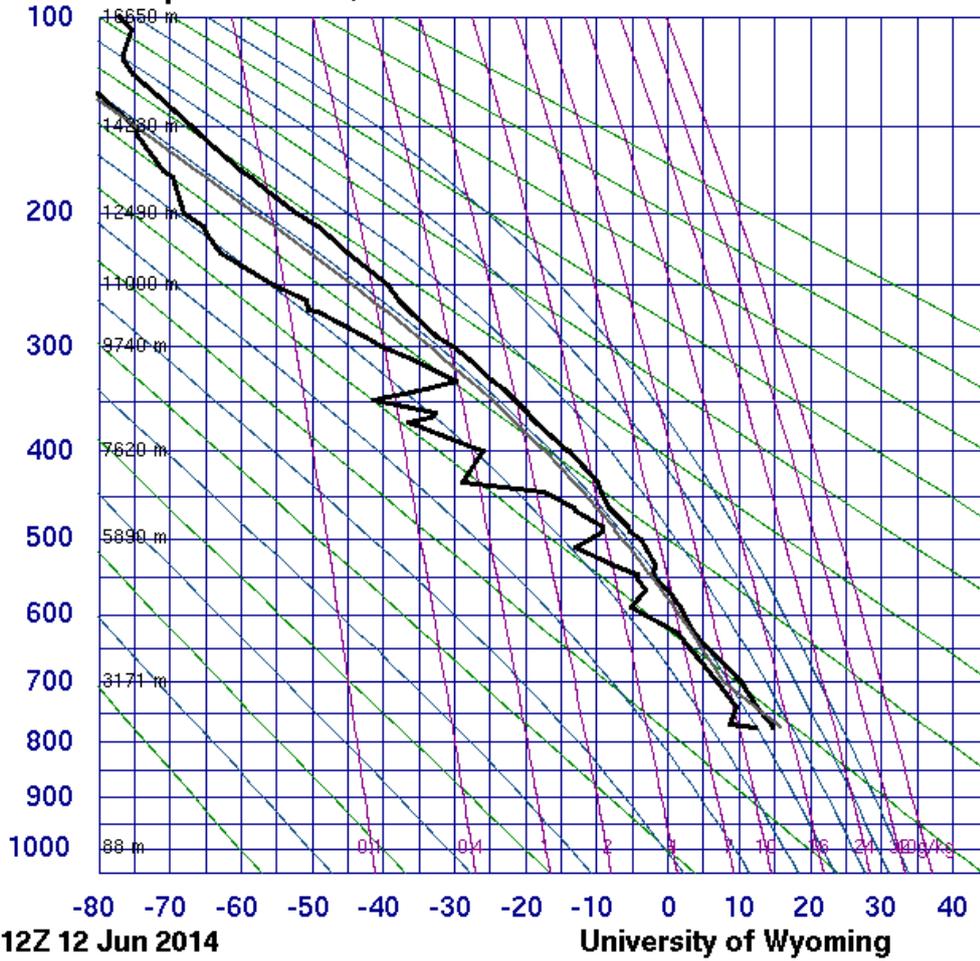


Handwritten notes in black ink, including a vertical column of characters and some illegible scribbles.

SLAT	19.40
SLON	-99.20
SELV	2313.
SHOW	-9999
LIFT	5.55
LFTV	5.14
SWET	-9999
KINX	-9999
CTOT	-9999
VTOT	-9999
TOTL	-9999
CAPE	0.00
CAPV	0.00
CINS	0.00
CINV	0.00
EQLV	-9999
EQTV	-9999
LFCT	-9999
LFCV	-9999
BRCH	0.00
BRCV	0.00
LCLT	277.0
LCLP	692.5
MLTH	307.7
MLMR	7.42
THCK	5784.
PWAT	11.74

All: Radiosondeo 12 de junio de2014, 12UTC.

76679 Aerop. Intl Mexico, D.F.



SLAT 19.40
 SLON -99.20
 SELV 2313.
 SHOW -9999
 LIFT 2.51
 LFTV 2.29
 SWET -9999
 KINX -9999
 CTOT -9999
 VTOT -9999
 TOTL -9999
 CAPE 0.00
 CAPV 0.02
 CINS 0.00
 CINV -72.5
 EQLV -9999
 EQTV 550.4
 LFCT -9999
 LFCV 553.2
 BRCH 0.00
 BRCV 0.00
 LCLT 281.4
 LCLP 707.5
 MLTH 310.7
 MLMR 9.85
 THCK 5802.
 PWAT 22.54