



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Coefficiente de ventilación en el Valle de México:
resultados numéricos y observaciones.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Físico

PRESENTA:

Claudio Marcelo Pierard Manzano

TUTOR

Dr. Angel Ruiz Angulo

Ciudad Universitaria, CD. MX. 2018





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

- **Datos del alumno**

Pierard
Manzano
Claudio Marcelo
55 10 80 13 55
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Física
41100856-5

- **Datos del tutor**

Dr.
Angel
Ruiz
Angulo

- **Datos del sinodal 1**

Dr.
Jorge
Zavala
Hidalgo

- **Datos del sinodal 2**

Dr.
Harry
Alvarez
Ospina

- **Datos del sinodal 3**

Dra.
Claudia Inés
Rivera

- **Datos del sinodal 4**

Dra.
Erika Danaé
López
Espinoza

- **Datos del trabajo escrito**

Coeficiente de ventilación en el Valle de México: resultados numéricos y observaciones
85 p.
2018

Resumen

En el presente trabajo se estudió el coeficiente de ventilación y su relación con la concentración de contaminantes en el Valle de México, para el año 2015, usando salidas del modelo meteorológico WRF. La primera parte de este estudio consistió en caracterizar el coeficiente de ventilación en el Valle de México, para conocer su variación mensual y estacional. Se pudo observar que los coeficientes de ventilación más altos se registraron en la temporada seca cálida, principalmente en el mes de abril, y los más bajos durante la temporada seca fría.

Como segunda parte, se estudió la relación entre el coeficiente de ventilación y las concentraciones de ozono, monóxido de carbono y material particulado menor a $2.5 \mu m$, usando diagramas de tipo espacio-fase y series de tiempo. El estudio se centró en los meses donde se registraron eventos de precontingencia ambiental, en el 2015. Se logró identificar las condiciones necesarias para determinar episodios con mala ventilación, para cada contaminante.

Adicionalmente, se realizó una validación extensiva de la altura de la capa límite, estimada por el modelo WRF, con mediciones realizadas con un ceilómetro en el Centro de Ciencias de la Atmósfera. Se encontró que el modelo subestimó la altura de la capa límite durante las horas de la noche, en todo el año 2015. También se pudo observar que el modelo subestimó la altura de capa límite diurna en la temporada seca fría.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres por dárme todo y por su apoyo incondicional. A Elena y Amanda, todo su apoyo y por recordarme lo sencilla que es la vida y enseñarme a reírme de lo absurda que a veces puede ser. A todos mis amigos que conocí durante la carrera, por los buenos momentos que pasamos en la UNAM. A mi mejor amigo Jefte, por su amistad.

También agradezco al Dr. Angel Ruiz-Angulo por ser un excelente asesor y amigo, por todas las oportunidades que me brindó, las puertas que me ayudó a abrir y por siempre motivarme a superarme. A los integrantes del Laboratorio de Fluidos Geofísicos, por su amistad y ayuda, en especial a Daniel, por ayudarme a preparar y extraer las salidas del WRF, y a Oscar, por ayudarme a limpiar los datos de contaminación, usados en esta tesis. Agradezco a Jorge García Franco por permitirme usar los datos, ya procesados, de la altura de la capa límite medida con el ceilómetro del CCA. También agradezco el apoyo del proyecto PAPIIT IN109918.

Debo agradecer manera especial al Dr. Jorge Zavala Hidalgo, por darme la oportunidad de participar en el proyecto CENAPRED-FOPREDEN, que parcialmente financió este trabajo y me permitió aprender sobre modelos numéricos atmosféricos y la forma en cómo se prepara y se lleva a cabo un proyecto de esta magnitud. Agradezco también al grupo Interacción Océano Atmósfera por su apoyo y por las recomendaciones e ideas que me dieron para los proyectos que emprendí durante el último año.

You'll never walk alone.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Capa límite planetaria	2
1.1.1. Capa de mezcla	3
1.1.2. Capa residual	3
1.1.3. Capa límite nocturna estable	4
1.2. Circulación de vientos en el Valle de México	4
1.3. Contaminación en el Valle de México	5
1.3.1. Contaminantes y la Norma Oficial Mexicana	5
1.3.2. Contingencias ambientales en 2015	9
1.4. Coeficiente de ventilación	10
2. Metodología	13
2.1. Salidas del modelo WRF	13
2.1.1. Variable PBLH	14
2.1.2. Componentes de velocidad del viento	15
2.2. Validación de altura de capa límite planetaria	16
2.2.1. Observaciones	16
2.2.2. Comparaciones PBLH con observaciones	17
2.3. Estaciones de monitoreo de contaminantes	17
2.4. Cálculo del coeficiente de ventilación	18
2.4.1. Promedios mensuales del coeficiente de ventilación	19
2.5. Correlación entre VC y los contaminantes	20
2.5.1. Series de tiempo	21
2.5.2. Estudio de correlación	21
3. Resultados	25
3.1. Promedio mensual del VC	25
3.2. Promedio del VC máximo diario	28

3.3. Correlación de VC con contaminantes	32
3.3.1. Series de tiempo	32
3.3.2. Gráficas tipo espacio fase	43
4. Conclusión	49
A. Validación de altura de capa límite planetaria	53
A.1. Resultados mensuales	53
A.1.1. Temporada seca fría	53
A.1.2. Temporada seca cálida	57
A.1.3. Temporada de lluvias	58
A.2. Coeficiente de correlación mensual	62
A.3. Altura máxima promedio mensual	63
Bibliografía	65

Índice de figuras

1.1. Orografía del Valle de México. En la parte central de la imagen se aprecia el Valle de México, rodeado por los volcanes Popocatepetl y el Iztaccíhuatl a su derecha. Las unidades de la escala de colores es de metros sobre el nivel del mar.	1
1.2. Diagrama de la evolución diaria de la estructura de la capa límite atmosférica. Imagen basada en el esquema de capa límite de Stull [4].	3
1.3. Tendencias históricas de las concentraciones de distintos contaminantes en el Valle de México. En cada panel (a-d), la línea más oscura representa el promedio en cada año, y los puntos señalados por las siglas representan las estaciones donde se midieron los máximos y mínimos para cada año. Imágenes tomadas del sitio web de la Dirección de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México [14].	8
1.4. Comparación entre el ciclo diario de coeficiente de ventilación (línea punteada) y el ciclo diario del ozono (línea sólida), para el mes de julio en Filadelfia, Estados Unidos. La imagen fue sacada del artículo de Athanassiadis <i>et al.</i> [16].	11
2.1. Mapa de los dominios del WRF, el dominio uno esta delimitado por el cuadro grande y el cuadro pequeño en el centro de México, corresponde al dominio dos.	14
2.2. Distintos tipos de malla de Arakawa [23].	15
2.3. Mapa de las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico que se encontraban en operación durante en 2015.	18
3.1. Promedios mensuales del coeficiente de ventilación (panel superior), promedios mensuales de la altura de capa de mezcla (panel medio) y promedio mensual de la rapidez promedio dentro de la capa de mezcla (panel inferior), durante el año 2015.	26

3.2.	Promedios mensuales del coeficiente de ventilación máximo diario, para el 2015. En el panel a la mitad se muestran los promedios mensuales de la altura de capa de mezcla, asociados a coeficiente de ventilación máximo diario. En el panel inferior se muestra la rapidez promedio dentro de la capa de mezcla, también asociado al coeficiente de ventilación máximo diario.	29
3.3.	Series de tiempo horarias para el mes de marzo, del valor coeficiente de ventilación contra los contaminantes: O ₃ , CO y PM _{2.5}	37
3.4.	Series de tiempo horarias para el mes de abril, del valor coeficiente de ventilación contra los contaminantes: O ₃ , CO y PM _{2.5}	38
3.5.	Series de tiempo horarias para el mes de mayo, del valor coeficiente de ventilación contra los contaminantes: O ₃ , CO y PM _{2.5}	39
3.6.	Series de tiempo horarias para el mes de junio, del valor coeficiente de ventilación contra los contaminantes: O ₃ , CO y PM _{2.5}	40
3.7.	Series de tiempo horarias para el mes de octubre, del valor coeficiente de ventilación contra los contaminantes: O ₃ , CO y PM _{2.5}	41
3.8.	Series de tiempo horarias para el mes de diciembre, del valor coeficiente de ventilación contra los contaminantes: O ₃ , CO y PM _{2.5}	42
3.9.	Gráficas tipo espacio-fase para el ozono, pertenecientes a los meses de marzo, abril, mayo, junio, octubre y diciembre.	45
3.10.	Gráficas tipo espacio-fase para los PM _{2.5} , pertenecientes a los meses de marzo, abril, mayo, junio, octubre y diciembre.	47
3.11.	Gráficas tipo espacio-fase para el monóxido de carbono, pertenecientes a los meses de marzo, abril, mayo, junio, octubre y diciembre.	48
A.1.	Validación de altura de capa de mezcla para el mes de enero (paneles superiores) y febrero (paneles inferiores), parte de la temporada seca.	55
A.2.	Validación de altura de capa de mezcla para el mes de noviembre (paneles superiores) y diciembre (paneles inferiores), parte de la temporada seca.	56
A.3.	Validación de altura de capa de mezcla para el mes de marzo (paneles superiores) y abril (paneles inferiores).	58
A.4.	Validación de altura de capa de mezcla para el mes de mayo (paneles superiores), junio (paneles medios) y julio (paneles inferiores), pertenecientes a la primera parte de la temporada de lluvias.	60

A.5. Validación de altura de capa de mezcla para el mes de agosto (paneles superiores), septiembre (paneles medios) y octubre (paneles inferiores), pertenecientes a la segunda parte de la temporada de lluvias. . .	61
A.6. Gráfica comparativa entre los coeficientes de correlación mensuales de la altura de capa de mezcla medida con el con el ceilómetro contra los del modelo, para el año 2015.	62

Índice de cuadros

3.1. Promedios mensuales descritos en las secciones 3.1 y 3.2. El subíndice <i>avg</i> denota los promedios de todo el mes de la sección 3.1, mientras que el subíndice <i>max</i> denota el promedio de los máximos diarios descritos en la sección 3.2.	33
A.1. Alturas de capa límite máximas de los promedios mensuales del modelo WRF (PBLH) y del ceilómetro (LIDAR). Los meses en color azul pertenecen a la temporada seca fría, el color naranja a la seca caliente y en verde a la temporada de lluvias.	63

Capítulo 1

Introducción

La Ciudad de México y la zona conurbada del Estado de México conforman la Zona Metropolitana del Valle de México, la cual se encuentra en la región centro del país conformada por el Estados de México, Hidalgo, Morelos y Ciudad de México. Según el último censo del INEGI en esta región habitan aproximadamente 20 millones de personas [1]. La orografía del Valle de México es una cuenca elevada que se encuentra aproximadamente a 2250 msnm. Se caracteriza por ser una cuenca plana. Mide 100 km de norte a sur y 50 km de este a oeste. El valle está rodeado de montañas con una elevación de entre 600 m a 800 m sobre el valle, sin embargo, al este de la cuenca se encuentran el Popocatepetl y el Iztaccíhuatl, volcanes que se elevan a más de 5000 msnm [2].

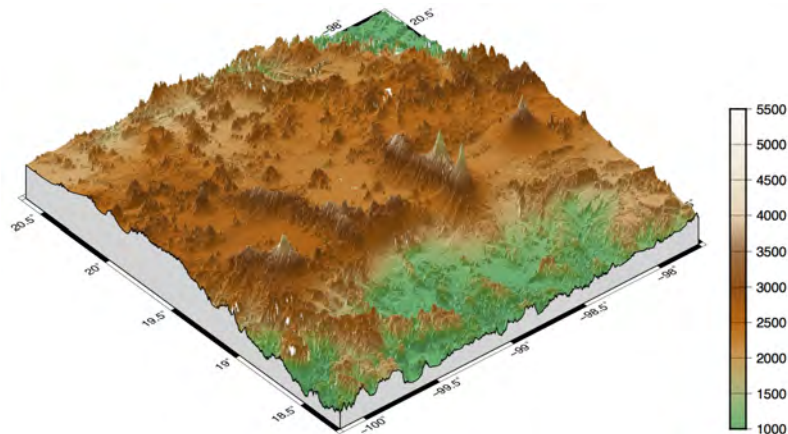


Figura 1.1: Orografía del Valle de México. En la parte central de la imagen se aprecia el Valle de México, rodeado por los volcanes Popocatepetl y el Iztaccíhuatl a su derecha. Las unidades de la escala de colores es de metros sobre el nivel del mar.

El Valle de México se caracteriza por tener mala calidad del aire durante la

mayor parte del año debido a las emisiones asociadas a la actividad humana, de las cuales destacan en las emisiones del tránsito vehicular e industria localizada dentro del Valle de México. Por lo general, cada año la Ciudad de México tiene periodos de contingencia, en donde altas concentraciones de ciertos contaminantes resultan en mala calidad del aire, lo que pone en riesgo la salud de los habitantes del valle.

Conocer las fuentes de contaminación es esencial para determinar la contaminación atmosférica en las ciudades, sin embargo, existen factores meteorológicos que pueden agravar o mejorar la calidad del aire, ya que impiden o propician la ventilación o dilución de contaminantes. Por ello, es importante estudiar de qué manera afectan dichos factores a la contaminación en las ciudades.

La interacción entre las condiciones meteorológicas y la contaminación es un fenómeno complejo, donde intervienen muchos factores, sin embargo, varios autores como Lu *et al.* [3] y (alguien más) señalan que dos de los principales factores meteorológicos que afectan las concentraciones de contaminantes en niveles cercanos a la superficie son la capa límite atmosférica y la velocidad del viento.

1.1. Capa límite planetaria

La capa límite planetaria se define como la parte de la tropósfera que está en contacto con la superficie y que es influenciada directamente por forzamientos de la superficie, como la fricción, evaporación, transferencia de calor, emisión de contaminantes y por el terreno [4]. El espesor o la altura de la capa límite planetaria varía a lo largo del día y depende de la ubicación. Principalmente el espesor varía por la incidencia de radiación solar en la superficie, lo que hace que las parcelas de aire en contacto con la superficie adquieran más flotación, generando convección. La altura de la capa límite está directamente relacionada con el mezclado vertical de contaminantes emitidos en la superficie [5].

En la figura 1.2 se aprecia la estructura y evolución temporal de la capa límite planetaria, de las cuales destacan la capa de mezcla, la capa residual y la capa límite nocturna estable. Cada una de éstas tiene características especiales y diferentes procesos físicos que las distinguen entre ellas. Para entender la dinámica de la capa límite planetaria es necesario definir cada una de ellas, sin embargo, en este estudio se estudió la capa límite planetaria de forma global, haciendo énfasis sólo en su altura.

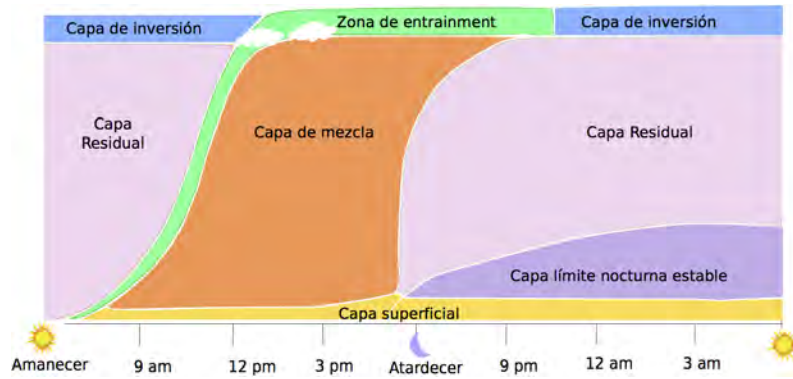


Figura 1.2: Diagrama de la evolución diaria de la estructura de la capa límite atmosférica. Imagen basada en el esquema de capa límite de Stull [4].

1.1.1. Capa de mezcla

La capa de mezcla, o también conocida como capa convectiva, es una una región turbulenta de la capa límite dominada por convección, creada por el gradiente de temperaturas entre la superficie y el límite superior de la capa de mezcla. La turbulencia hace que se mezclen homogéneamente el calor, la humedad y los contaminantes emitidos dentro de esta capa [4]. Usualmente se usa el nombre de capa de mezcla para referirse a la capa límite planetaria, en este trabajo se hace alusión a la capa límite como capa de mezcla.

La altura de la capa de mezcla es el espesor sobre la superficie de dicha capa donde los contaminantes son diluidos por la convección o por turbulencia en una escala temporal de alrededor de una hora [6]. Por esta razón, la altura de capa de mezcla juega un papel importante en la concentración de contaminantes. Entre mayor sea la altura de la capa de mezcla, mayor es el volumen en que pueden ser diluidos los contaminantes, y por tanto, las concentraciones de ellos disminuyen. En cambio, cuando la altura de capa de mezcla es muy baja, el volumen para diluir los contaminantes es pequeño, lo que provoca que las concentración de contaminantes aumente.

La capa de inversión o de *entrainment* es el límite que separa la capa de mezcla con la atmósfera libre. Es ahí donde ocurren los intercambios de masa y energía entre la capa de mezcla y la atmósfera libre. Esta capa hay una inversión térmica que tiende a confinar la convección hasta una cierta altura.

1.1.2. Capa residual

La capa residual se define como la capa que está neutramente estratificada y es homogénea, formada por decaimiento de la turbulencia en la capa de mezcla que

ocurre por el debilitamiento de los flujos convectivos al anochecer [7]. La capa residual no tiene contacto directo con el suelo y su espesor se reduce conforme avanza la noche debido a que la capa límite estable nocturna incrementa su altura debido a la turbulencia causada por la interacción con la superficie [4].

La dispersión de contaminantes en esta capa se caracteriza por ser homogénea en todas las direcciones, es decir, que una parcela de contaminante se dispersa con la misma rapidez en todas direcciones, debido a que la capa de residual está neutramente estratificada, y que la turbulencia es pequeña y homogénea en todas direcciones.

1.1.3. Capa límite nocturna estable

Al igual que la capa residual, la capa límite nocturna estable se forma durante la noche. Esta capa se caracteriza por tener turbulencia esporádica causada por la cizalla del viento y el contacto con la superficie, pero en general tiende a suprimir la turbulencia. El límite superior de la capa límite estable se localiza a la altura en donde la intensidad de la turbulencia es una pequeña fracción de su valor en superficie [4].

Los contaminantes emitidos en esta capa se dispersan de forma más rápida en la horizontal que en la vertical, debido a que no hay flujos convectivos que transporten los contaminantes hacia arriba.

1.2. Circulación de vientos en el Valle de México

El Valle de México se encuentra en una región geográfica donde coexisten valles y montañas, que crea una orografía accidentada, que tiene influencia en los patrones de circulación de los vientos. Adicionalmente, el valle está localizado la parte central del país, donde los sistemas sinópticos del Pacífico y los del Golfo de México influyen en los patrones de viento.

Climatológicamente, los vientos del Valle de México se clasifican principalmente en dos patrones de escala sinóptica: vientos secos del oeste con condiciones anticiclónicas, ocurren de noviembre a abril, y vientos húmedos del este, causados un debilitamiento en los vientos alisios para la segunda mitad del año. Estas condiciones sinópticas resultan en las tres temporadas que conocemos: seca y fría de noviembre a febrero, la temporada seca cálida de marzo a abril y la temporada de lluvias de mayo a octubre [2, 8].

Localmente existen los fenómenos denominados brisas valle-montaña, que se ori-

ginan debido al enfriamiento y calentamiento diferencial del valle y las laderas de las montañas. Comúnmente durante el día se generan corrientes pendiente arriba y durante la noche, corrientes pendiente abajo. Particularmente, parte del área metropolitana de la Ciudad de México se encuentra dentro de una región valle-montaña, que cumple las condiciones geográficas para generar este tipo de flujos. Estas corrientes pueden superponerse sobre los vientos dominantes, contribuyendo localmente a la variabilidad estacional de los patrones de circulación. Durante diversas campañas en el área metropolitana de la Ciudad de México (MCMA-2003, MILAGRO, ECAIM) se han identificado los principales patrones de circulación del aire para diversas condiciones sinópticas. En estos estudios se menciona la existencia de flujos pendiente abajo durante la noche y pendiente arriba durante el día. Además, existe una conjetura sobre la posible intensificación de estos flujos debido a el efecto de la isla de calor urbana [9, 2, 8, 10, 11]. Los mecanismos que generan la circulación del viento en el valle son complejos y tienen implicaciones en muchos aspectos relacionados con la ventilación en la región.

1.3. Contaminación en el Valle de México

Históricamente la Ciudad de México se caracteriza por tener mala calidad del aire, debido a su orografía, a su clima y a las altas emisiones de contaminantes. Actualmente la ciudad sigue teniendo episodios de alta contaminación, sin embargo, las concentraciones máximas se han reducido gracias a la implementación de programas de control y reducción de contaminantes por el gobierno de la Ciudad de México y el Estado de México.

La Dirección de Monitoreo Atmosférico es la encargada de revisar y establecer los límites de concentraciones de contaminantes, basándose en estudios en el Valle México y en los estándares sugeridos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Los límites establecidos por la Dirección de Monitoreo Atmosférico se le conoce como la Norma Oficial Mexicana (NOM).

1.3.1. Contaminantes y la Norma Oficial Mexicana

A continuación se describe los límites establecidos en la Norma Oficial Mexicana para los contaminantes usados en este estudio.

Ozono

El ozono (O_3) es un contaminante que se forma de la reacción entre compuestos orgánicos volátiles (COV) con óxidos de nitrógeno (NO_x), en presencia de la radiación solar. Las principales fuentes responsables de emitir los precursores del ozono son las actividades de tipo residencial, que son responsables de producir la mayor cantidad de compuestos orgánicos volátiles. Por otro lado, el transporte es principal emisor de óxidos de nitrógeno en la ciudad.

El comportamiento del ozono es bastante complejo, debido a que su origen está relacionado a múltiples factores y precursores. Sin embargo, las concentraciones de ozono están fuertemente relacionado con la cantidad de luz solar que incide en la troposfera. Por lo general las concentraciones de ozono alcanzan su máximo durante el día, debido a la radiación solar. En cambio, durante la noche, se observa una caída en las concentraciones debido a que no hay radiación solar que produzca ozono. El ozono que se tiene durante la noche es un remanente del ozono producido durante el día.

Según la OMS [12], el ozono es nocivo para la salud cuando es inhalado en concentraciones altas, causando enfermedades respiratorias, envejecimiento del tejido pulmonar y daños pulmonares. Por esta razón se establecieron los límites permisibles de concentración de ozono para el ser humano, que permiten alertar a la población de eventos de alta contaminación y establecer políticas que ayuden a mitigar la contaminación por ozono. Actualmente en la Ciudad de México, la Norma Oficial Mexicana (NOM-020-SSA1-2014) establece que el valor límite de concentración de ozono es de 95 ppb, para el promedio de concentraciones en una hora. Según la misma norma, el valor límite para el promedio en ocho horas es de 70 ppb.

Desde un aspecto climatológico, se ha observado que los meses en donde hay mayor ocurrencia de eventos, en los cuales los niveles de ozono superan a los de límites de la NOM, es durante la temporada seca cálida y parte de la de lluvias, entre los meses de marzo a mayo. Esto se debe a que la condiciones meteorológicas son favorables para la formación de ozono, debido a los sistemas de alta presión en la región centro del país, que favorecen cielos despejados y estabilidad atmosférica [13].

Históricamente, se ha observado que las concentraciones de ozono en la Ciudad de México han disminuido en el periodo comprendido entre 1988 y 2017. La figura 1.3a muestra esta tendencia, donde se puede apreciar que a pesar de que se han reducido las concentraciones de ozono, los niveles siguen siendo altos para los últimos años. Esto refleja que el ozono es uno de los contaminantes prioritarios para monitorear y estudiar en el Valle de México.

Monóxido de carbono

El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro compuesto por un átomo de carbono y un átomo de oxígeno. Éste puede ser muy dañino para la salud al ser inhalado, incluso puede ser mortal cuando es inhalado en altas concentraciones. Las principales fuentes de CO en el Valle de México están relacionadas con el transporte y las actividades domésticas que involucran la quema incompleta de combustibles como gas, madera, gasolina, etc.

La Norma Oficial Mexicana, en el oficio NOM-021-SSA1-1993, actualizada por última vez en 1994, establece que el límite permisible para las concentraciones de monóxido de carbono es de 11 ppm, para el promedio móvil de ocho horas.

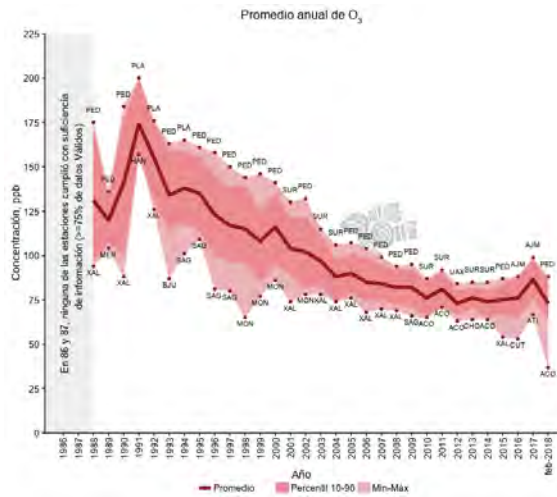
En la figura 1.3b se puede apreciar el histórico del promedio anual de las emisiones de monóxido de carbono. Se observa que entre los años 1990 a 1992 hubo un repunte en la emisiones en el Valle de México, sin embargo, actualmente se han reducido bastante a partir de 1992, y se han mantenido por debajo de los límites de la NOM, a pesar de que el parque vehicular y el número de habitantes ha aumentado.

PM₁₀

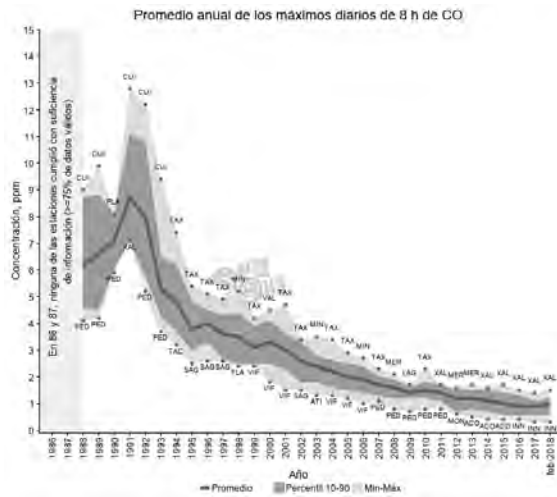
El acrónimo PM hace referencia a *Particulate Matter*, que se traduce a «material particulado». El subíndice que lo acompaña hace alusión a diámetro máximo de las partículas que engloba el término. Por tanto, los PM₁₀ son material particulado que tienen diámetros menores a 10 μm . Estos son malos para la salud, dependiendo del tamaño de las partículas y de sus concentraciones. Están relacionados con enfermedades cardiovasculares y respiratorias. Las principales fuentes de PM₁₀ son las construcciones, el polvo levantado por la circulación del tránsito en las calles y las partículas que levanta el viento en terrenos erosionados. Un porcentaje menor de material particulado es generado por las industrias dentro del Valle de México.

Los límites establecidos por la Norma Oficial Mexicana (NOM-020-SSA1-2014) establece que los límites permisibles para la concentración de PM₁₀ es de 75 $\mu g/m^3$, para el promedio de 24 horas. Para el promedio anual, el límite está en 40 $\mu g/m^3$.

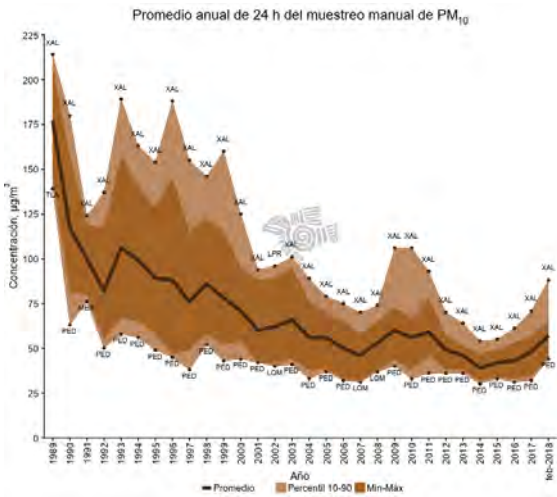
En la figura 1.3c se puede observar como ha cambiado las concentraciones anuales promedio de los PM₁₀. Se aprecia que se ha reducido la concentración, desde que se empezó a medirla en el año 1989, hasta la actualidad. Sin embargo, todos los promedios anuales superan el límite de 40 $\mu g/m^3$ establecido por la NOM, inclusive el del 2017 y lo que va del 2018, donde se aprecia un repunte. Por esta razón, el monitoreo de este contaminante en el Valle de México es de gran importancia para



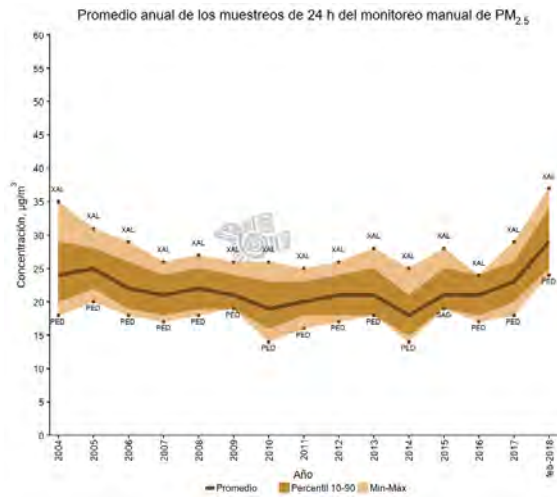
(a) Ozono



(b) Monóxido de carbono



(c) PM_{10}



(d) $PM_{2.5}$

Figura 1.3: Tendencias históricas de las concentraciones de distintos contaminantes en el Valle de México. En cada panel (a-d), la línea más oscura representa el promedio en cada año, y los puntos señalados por las siglas representan las estaciones donde se midieron los máximos y mínimos para cada año. Imágenes tomadas del sitio web de la Dirección de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México [14].

la salud de los habitantes.

PM_{2.5}

El término PM_{2.5} se refiere al material particulado con un diámetro menor a 2.5 μm . Los PM_{2.5} son más dañinos para la salud al ser inhalados, que los de 10 μm , debido a que son partículas más pequeñas, y también están relacionadas con enfermedades cardiovasculares y respiratorias. Los PM_{2.5} se originan principalmente por combustión incompleta y sus concentraciones varía mucho de ciudad a ciudad, ya dependen mucho de la geografía, la meteorología y las fuentes de material particulado, de la ciudad.

La Norma Oficial Mexicana (NOM-020-SSA1-2014) indica que los valores permisibles para las concentraciones de PM_{2.5} es de 45 $\mu g/m^3$, para el promedio en 24 horas. Mientras que el límite para el promedio anual es de 12 $\mu g/m^3$.

La figura 1.3d muestra los promedios anuales de concentraciones de PM_{2.5}. Para este contaminante, solamente se tiene mediciones a partir del 2004, debido a que los instrumentos para medir los PM_{2.5} requieren de técnicas modernas, que antes no existían. En esta gráfica se aprecia que las concentraciones se han mantenido prácticamente constantes durante los 13 años. Cabe resaltar que, durante estos años, se a excedido el límite el promedio anual de 12 $\mu g/m^3$, establecido por la NOM. Se observa que los promedios anuales oscilan entre los 20 $\mu g/m^3$ y los 30 $\mu g/m^3$. Esto indica que la contaminación por PM_{2.5} en el Valle de México sigue siendo más alta de lo recomendable.

1.3.2. Contingencias ambientales en 2015

La Dirección de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México es la encargada en aplicar el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA). Este programa se activa cuando las concentraciones ozono o PM₁₀ superan los niveles en donde puede haber daños a la salud de la población. La finalidad de este programa es alertar a la población e implementar acciones que permitan controlar y reducir de forma inmediata los altos niveles de contaminantes. El PCAA se caracteriza por tener tres etapas de alerta: Fase de Precontingencia, Fase I y Fase II. Estas fases se activan cuando en cualquier estación de monitoreo de la zona conurbada se detectan niveles superiores a los límites establecidos. En el caso del ozono, se activa la Fase de Precontingencia cuando las concentraciones superan los 155 ppb, la Fase I se activa cuando las concentraciones superan los 184 ppb y la Fase II se activa cuando los

niveles superan los 265 ppb. Para los PM_{10} , la Fase de Precontingencia se activa cuando se supera los $215 \mu g/m^3$, la Fase I se activa cuando se supera los $283 \mu g/m^3$ y la Fase II cuando se supera los $376 \mu g/m^3$. Cabe resaltar, que la Dirección de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México no contempla al monóxido de carbono ni a los $PM_{2.5}$ dentro del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas.

Según el informe anual de calidad del aire en la Ciudad de México del 2015, durante el año 2015 hubo siete episodios de Fase de Precontingencia, de los cuales seis fueron por ozono y uno fue por PM_{10} . A pesar de esto, no se activó nunca la Fase I, ni la Fase II [13]. Los episodios de Precontingencia por ozono sucedieron el 3 de marzo, el 8 de abril, el 5 de mayo, el 9 de mayo, el 10 de junio y el 4 de octubre. Mientras que el único episodio de Precontingencia por PM_{10} sucedió el 25 de diciembre.

1.4. Coeficiente de ventilación

El coeficiente de ventilación (VC) es un índice o indicador del transporte de aire dentro de la capa de mezcla. Se define como la multiplicación de la altura de la capa límite planetaria y la magnitud promedio de la velocidad del viento horizontal dentro de la capa límite. Esta idea surge a partir del supuesto de que los principales factores meteorológicos que afectan la concentración y dispersión de contaminantes en la superficie son la altura de la capa límite y el viento dentro ella [15, 3]. Mientras más alto es el coeficiente de ventilación, la dispersión de contaminantes es más eficiente y la calidad del aire es mejor. En cambio, entre más bajo sea el coeficiente de ventilación, la dispersión de contaminantes es menos eficiente, lo que causa mala calidad del aire debido al estancamiento de éste.

El coeficiente de ventilación se caracteriza por tener un ciclo diario similar al de la capa límite planetaria, donde alcanza sus valores máximos durante la tarde y los menores durante la noche. En la figura 1.4, se puede apreciar el ciclo diario del coeficiente de ventilación, donde se ilustra este ciclo.

Se han realizado varios estudios del coeficiente de ventilación, algunos de ellos enfocados en caracterizarlo en cierta región. Por ejemplo, Krisnan *et al.* [5] caracterizaron el coeficiente de ventilación en Gadanki, India, para el año 1999 y parte del 2000. El estudio mostró que los coeficientes de ventilación alcanzan su máximo al medio día, y que estacionalmente, el coeficiente de ventilación es bajo durante invierno y alto durante el periodo del monzón. En otro estudio realizado por Iyer y Ernest Raj [17], se estudió la variación del coeficiente de ventilación, usando datos

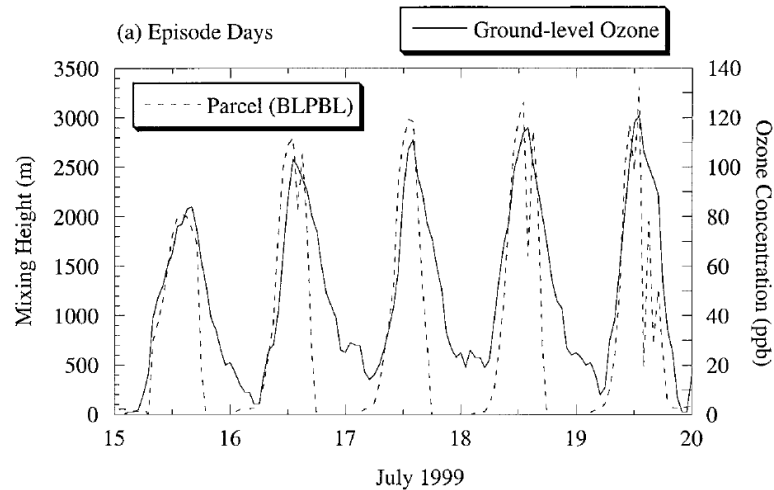


Figura 1.4: Comparación entre el ciclo diario de coeficiente de ventilación (línea punteada) y el ciclo diario del ozono (línea sólida), para el mes de julio en Filadelfia, Estados Unidos. La imagen fue sacada del artículo de Athanassiadis *et al.* [16].

de radiosondeos en cuatro ciudades en India, para los meses de invierno, durante los años 1970 y 2000. Se encontró que el coeficiente de ventilación decreció, en los 30 años analizados, debido a que la magnitud del viento y la altura de la capa límite decrecieron.

Otros estudios se enfocan en la relación que existe entre el coeficiente de ventilación y la contaminación atmosférica. Por ejemplo el estudio realizado por Lu *et al.* [3], donde se encontró que el coeficiente de ventilación diurno está negativamente correlacionado con la concentración de PM_{10} , en la ciudad de Changsha, China. Otro estudio, realizado por Berman *et al.* [18], se encontró que el coeficiente de ventilación es 50% menor en la mañana, en días donde hubo altas concentraciones de ozono durante el mes de Julio de 1999, en Filadelfia, Estados Unidos.

Los estudios mencionados sugieren que existe una variación diurna y anual del coeficiente de ventilación, única en cada región, y que está fuertemente relacionada a la concentración de contaminantes cerca de la superficie. Sin embargo, el Valle de México carece de estudios del coeficiente de ventilación en un periodo representativo, a pesar de ser una región donde la contaminación ambiental es un tema de investigación prioritario.

Algunos autores como Iyer y Ernest Raj [17] y García-Reynoso *et al.* [19], usan ciertos criterios para identificar escenarios de mala contaminación del aire en su respectiva región de estudio. En el reporte del Centro Nacional Meteorológico de Estados Unidos, para su programa de predicción del potencial de contaminación atmosférica, publicado en 1970 [20], se establece que para que el potencial de con-

taminación sea alto en una región, se deben cumplir cualquiera de los siguientes criterios:

- Durante la tarde, el coeficiente de ventilación no debe ser mayor a $6000 \text{ m}^2/\text{s}$ y la velocidad del viento no debe exceder los 4 m/s .
- Durante la mañana, la altura de capa de mezcla no debe exceder los 500 m y el viento no puede ser mayor a 4 m/s .

Estos criterios son útiles para pronosticar eventos de estancamiento de aire, donde la contaminación es alta. Sin embargo, no hay estudios que indiquen que estos criterios son válidos para el Valle de México.

En la sección [2.4](#) se define con más precisión el coeficiente de ventilación y se define la metodología que se siguió para el estudio de este.

Capítulo 2

Metodología

El objetivo de esta tesis fue caracterizar el coeficiente de ventilación en el Valle de México, para el año 2015, usando simulaciones atmosféricas realizadas con el modelo *Weather Research and Forecasting Model*. La caracterización se enfocó en estudiar la variación mensual del coeficiente de ventilación y analizar la influencia que tiene la altura de capa límite y la rapidez del viento, en la ventilación. Como segunda parte, se estudió la relación entre el coeficiente de ventilación y las concentraciones de diversos contaminantes, usando diagramas de tipo espacio-fase y series de tiempo. Este análisis se centró en los meses donde se registraron eventos de precontingencia ambiental. Adicionalmente, se realizó una validación de la altura de la capa límite, estimada por el modelo numérico usado, con mediciones realizadas con un ceilómetro en el Centro de Ciencias de la Atmósfera, durante el año 2015.

A continuación se describe la metodología implementada en este trabajo.

2.1. Salidas del modelo WRF

El modelo meteorológico usado en este estudio fue el *Weather Research and Forecasting Model*, (WRF); un modelo de mesoescala ampliamente utilizado y desarrollado por el Centro Nacional de Investigación Atmosférica de Estados Unidos (NCAR) y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA), la Universidad de Oklahoma, la Administración Federal de Aviación de Estados Unidos (FAA), entre otras [21].

El modelo WRF usa mallas rectangulares regulares, cuya resolución espacial depende del dominio al que pertenezcan. Las simulaciones utilizadas para este estudio tienen dos dominios. El *dominio uno*, que abarca toda la república mexicana, América Central, parte de Estados Unidos y parte del Caribe, con una resolución

de la malla horizontal de 10 km. El *dominio dos*, que abarca la región central de la república mexicana y tiene una resolución de malla horizontal de 5 km. En la figura 2.1 se muestran estas regiones.

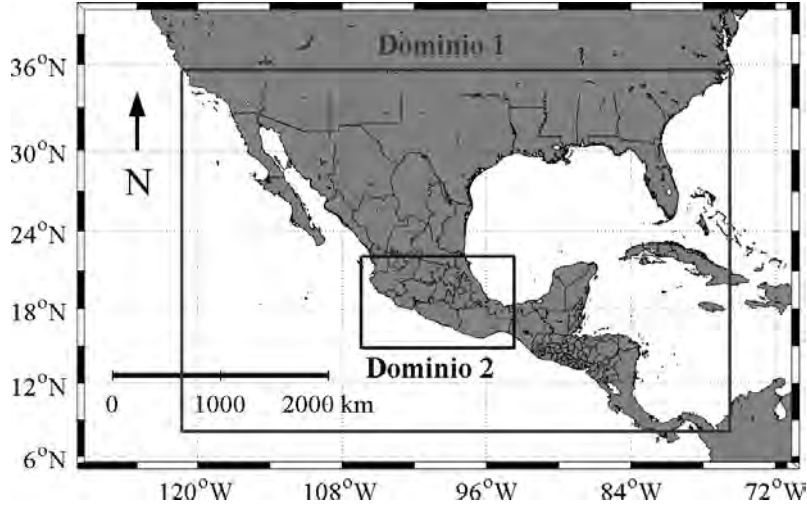


Figura 2.1: Mapa de los dominios del WRF, el dominio uno esta delimitado por el cuadro grande y el cuadro pequeño en el centro de México, corresponde al dominio dos.

Se seleccionó el *dominio dos* para los cálculos del coeficiente de ventilación y la validación de la altura de capa límite en el Valle de México. Adicionalmente, se interpolaron las salidas a una malla con una resolución de 2.5 km horizontalmente, para obtener más puntos dentro de los límites del Valle de México. Para agilizar el procesamiento de los datos, se recortó el dominio dos con la finalidad de tener un subdominio más pequeño, que incluyera el Valle de Toluca, la ciudad de Puebla, la ciudad de Querétaro y el Valle de México.

El modelo WRF se configuró en modo pronóstico y simula 120 horas a partir de las condiciones iniciales. En particular, este estudio se enfoca en estudiar las primeras 24 horas locales (UTC-6) de simulación, que corresponden al primer día de cada salida del modelo. Cabe mencionar que el análisis y procesamiento de datos para esta tesis se realizó con Python 3.5.

2.1.1. Variable PBLH

Dentro de las variables de salida del WRF está la variable PBLH, que significa *Planetary Boundary Layer Height*, lo que se traduce a altura de la capa límite planetaria. Esta variable indica el espesor en metros de la capa límite convectiva sobre la superficie, en un punto determinado. Debido a que la capa límite no se puede

resolver explícitamente en el modelo WRF, porque la resolución de las mallas no son lo suficientemente pequeñas para simular los principales mecanismos que rigen su dinámica, se recurre a parametrizaciones. En las simulaciones usadas para este estudio se utilizó la parametrización Yonsei University PBL (YSU PBL) debido a que históricamente es la que el grupo IOA ha utilizado [22].

La variación de la altura de capa de mezcla está ligada al ciclo solar diurno (ver Figura 1.2. Sin embargo, la hora de las salidas del WRF usadas se encontraban en UTC, lo que complica el análisis del ciclo diario de la altura de la capa límite, debido a que el Valle de México está en la zona horaria UTC-6. Por esta razón se decidió cambiar el horario de las salidas a UTC-6, y de esta forma obtener todas las variables de las salidas del WRF en la hora local del Valle de México.

2.1.2. Componentes de velocidad del viento

El viento en las salidas del modelo WRF se encuentra separado en sus tres componentes cartesianas U , V y W . Donde U es la magnitud en la dirección este-oeste, V en la dirección norte-sur y W en la vertical, z .

El algoritmo para resolver las ecuaciones que gobiernan el sistema en el WRF tienen una malla tipo Arakawa C. La malla Arakawa C se caracteriza por estar escalonada horizontalmente, es decir, los puntos en los que se resuelve las componentes de velocidad horizontal no coinciden con los puntos del resto de las variables del modelo (ver figura 2.2 C). Por esta razón, antes de usar las campos de las variables U y V fue necesario interpolar las componentes de la velocidad a la malla sobre la que se encuentra la variable PBLH. La interpolación que se realizó fue lineal.

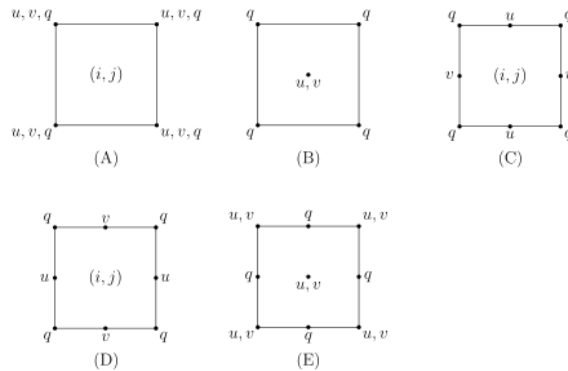


Figura 2.2: Distintos tipos de malla de Arakawa [23].

2.2. Validación de altura de capa límite planetaria

Una de las razones por las que se decidió usar el modelo WRF para este estudio, en vez de usar mediciones directas, fue el hecho de que no todas las estaciones meteorológicas dentro del Valle de México cuentan con ceilómetros u otro instrumento para calcular la altura de capa límite, ya que son instrumentos sofisticados y caros. Los radiosondeos tampoco son una opción, debido a que tienen poca resolución espacial y una frecuencia de lanzamientos pequeña, i.e., dos radiosondeos diarios, limitando la posible observación de la variación diurna del coeficiente de ventilación. En cambio, un modelo numérico puede simular la dinámica de la capa límite con mejor resolución espacial y temporal en una región más grande. Sin embargo, para que el estudio tenga validez, es necesario conocer el sesgo que tiene el modelo con respecto a la altura de la capa límite observada. En este sentido, se realizó un análisis formal de la validación extensiva de esta variable y está descrito en el Apéndice A.

2.2.1. Observaciones

Para validar la altura de capa límite, se usaron observaciones de la estación meteorológica del Centro de Ciencias de la Atmósfera, perteneciente a la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA), al sur de la Ciudad de México. La altura de capa de mezcla se midió usando un ceilómetro Vaisala CL31, con la técnica lidar. Esta técnica consiste en mandar pulsos láser dirigidos verticalmente hacia la atmósfera y medir la intensidad de la luz que es reflejada a diferentes alturas. Sin embargo, esto no da una medición directa de la altura de capa de mezcla, para esto es necesario procesar los datos del ceilómetro con la ayuda de diferentes algoritmos. Los datos usados para este estudio fueron procesados usando el método del gradiente en combinación con el método de transformada de covarianza de onda, descritos en el artículo de García-Franco [24].

Para poder comparar los datos de altura de capa de mezcla del WRF, con los datos de las mediciones del ceilómetro, fue necesario seleccionar los datos del ceilómetro, de tal forma que empaten temporalmente con los del WRF. Las salidas del modelo WRF están configuradas para proporcionar datos horarios, mientras que los datos del ceilómetro tienen una frecuencia de 10 minutos. Para lograr que correspondan, se hicieron promedios móviles alrededor de cada hora exacta, para los datos del ceilómetro, usando un intervalo de 30 minutos alrededor de las horas exactas. De esta forma se obtuvo datos de altura de capa de mezcla suavizados y con una frecuencia de una hora.

2.2.2. Comparaciones PBLH con observaciones

Se realizaron comparaciones entre la variable PBLH y la altura de capa de mezcla medida por el ceilómetro en el CCA. Para ello se seleccionó el punto de malla más cercano a las coordenadas de la estación CCA. Las comparaciones de ambas series se separaron por meses, para facilitar su estudio y poder caracterizar la ciclo típico correspondiente a cada mes.

La primera parte de la comparación consistió en promediar las alturas en cada hora, para todo el mes. Es decir, se seleccionó una hora en específico y se promediaron las alturas correspondientes a esa hora para todo el mes. Se hizo esto para las 24 horas del día, con lo que se obtuvo el ciclo diario promedio mensual de la altura de capa de mezcla. De igual forma se calculó la desviación estándar asociada a cada hora, para ver la variación de la altura al rededor del promedio mensual en dicha hora. Esto se hizo para las series datos del ceilómetro y del modelo.

Para comparar los ciclos diarios promedio del modelo y el ceilómetro, se graficaron en una misma figura con sus respectivas desviaciones estándar, marcadas como sobras alrededor del promedio. Esto permitió identificar las horas del día en las que el modelo subestima o sobreestima la altura, con respecto al ciclo diario promedio observado con el ceilómetro.

También se realizaron gráficos mensuales de dispersión, en donde se compararon, hora a hora, las alturas de capa de mezcla del ceilómetro contra las alturas de capa de mezcla del WRF. Para poder identificar de forma gráfica la hora a la que corresponde cada punto, se estableció una escala de colores discreta que divide el día en secciones de tres horas. Esto permitió identificar los intervalos del día en el que el modelo simula mejor la altura de capa de mezcla, con respecto al ceilómetro. Finalmente, se hizo una regresión lineal a cada gráfica de la cual se obtuvo el coeficiente de correlación y se comparó este error para todos los meses.

Los resultados de cada mes se agruparon de acuerdo a la temporada del año a la que pertenecen (seca fría, seca caliente y de lluvias), de esta forma se facilitó el estudio del modelo con respecto a los datos observados, porque permite identificar las similitudes y deficiencias que hay entre los meses que conforman cada temporada. Todas las comparaciones se muestran en el Apéndice [A](#).

2.3. Estaciones de monitoreo de contaminantes

La Red Automática de Monitoreo de Atmosférico (RAMA), de la Dirección de Monitoreo Atmosférico, tiene un conjunto de estaciones encargadas de medir concen-

traciones de dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono, PM_{10} y $PM_{2.5}$. Actualmente la conforman 29 estaciones de monitoreo, localizadas en la Ciudad de México y en el Estado de México [25]. Sin embargo, durante el año 2015, había 33 estaciones de monitoreo operativas. En la figura 2.3 se puede apreciar un mapa con la ubicación de las estaciones operativas durante el 2015.

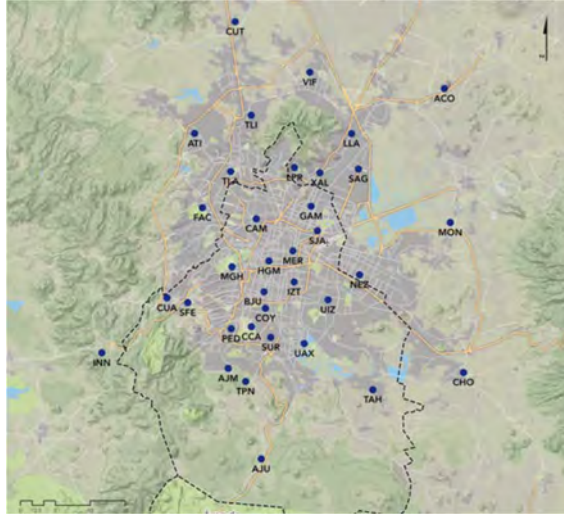


Figura 2.3: Mapa de las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico que se encontraban en operación durante en 2015.

Para este trabajo se usaron los datos de la estación del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), para realizar la comparación entre el coeficiente de ventilación y la concentración de contaminantes. Se decidió utilizar solamente esta estación para que el estudio fuera consistente con la validación de la capa límite.

2.4. Cálculo del coeficiente de ventilación

Como se mencionó en el capítulo uno, el coeficiente de ventilación (VC) se calculó usando la altura de la capa de mezcla y el promedio del perfil del vientos dentro de ella. Afortunadamente, existe una expresión matemática para su definición:

$$VC = Z_j U, \quad (2.1)$$

donde Z_j es la altura de la capa de mezcla sobre la superficie y U es el promedio de la magnitud del viento horizontal dentro de la capa límite. La variable U se calcula de la siguiente manera:

$$U = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{Z_j} \sqrt{u_i^2 + v_i^2}, \quad (2.2)$$

donde u_i es la componente zonal y v_i es la componente meridional del viento, en cierto nivel vertical denotado por el subíndice i . La variable n corresponde al número de niveles verticales dentro de la capa límite que se suman en la ecuación.

En la ecuación 2.2 se puede observar que el coeficiente sólo considera las componentes horizontales del viento, descartando la componente vertical. Esta aproximación se hace debido a que, dentro de la capa límite, los vientos horizontales usualmente tienen un orden de magnitud mayor que el viento vertical [4].

El coeficiente de ventilación es una cantidad escalar, es decir, no proporciona información sobre la dirección de ventilación, por lo que no se puede identificar la dirección hacia donde se ventilan los contaminantes. Las unidades del coeficiente de ventilación son m^2/s . Estas unidades no tienen una interpretación física clara, sin embargo, algunos autores como Gross [20] aseguran que es una medida de la tasa de volumen del transporte horizontal de aire dentro de la capa de mezcla, por unidad de distancia, normal al viento.

Para el estudio del coeficiente de ventilación, se decidió usar las primeras 24 horas de cada salida, y de esta forma poder construir series de tiempo con el primer ciclo diurno completo. Las variables que se ocuparon fueron: PBLH, y las componentes horizontales del viento (u y v). Posteriormente, se concatenaron las primeras horas de cada salida, para obtener una serie anual para cada variable. La serie anual se separó en series mensuales, del mismo modo que en la validación de PBLH. De esta forma se obtuvo una serie para cada mes del 2015, para las variables PBLH y u y v .

Antes de calcular el coeficiente de ventilación en todo el dominio, se promediaron las componentes horizontales del viento dentro de la capa de mezcla, usando la ecuación 2.2 en todo el dominio y para todos los tiempos. De este modo se obtuvieron series de tiempo para la rapidez promedio del viento dentro de la capa de mezcla, para cada mes del año. Con estas series y la de PBLH, se calculó el coeficiente de ventilación usando la ecuación 2.1, para todo el dominio recortado. A partir de esos productos, se obtuvieron series mensuales del coeficiente de ventilación.

2.4.1. Promedios mensuales del coeficiente de ventilación

A partir de la definición del coeficiente de ventilación (Eq. 2.1), podemos observar que el coeficiente puede estar dominado por la altura de capa límite o por la rapidez

promedio del viento. Uno de los objetivos de caracterizar el coeficiente de ventilación en el Valle de México, es conocer en qué época del año el coeficiente de ventilación es alto o bajo, e identificar cuál de las variables, PBLH ó U, es la que domina en la ventilación.

Para la estación representativa al CCA, se obtuvieron las series de tiempo mensuales del coeficiente de ventilación, así como las variables que lo componen: la altura de capa límite y la rapidez promedio del viento. A partir de ellas, se calculó el promedio mensual su desviación estándar. Las series obtenidas se graficaron en figuras con tres paneles para observar la relación que hay entre el promedio mensual del VC, con los promedios mensuales de la capa limite y rapidez promedio del viento. Cada promedio mensual se graficó con su desviación estándar correspondiente, a manera de barra error. Estas figuras se muestran en la sección 3.2.

Además de calcular el promedio mensual del coeficiente de ventilación para el 2015, se analizó la variación de los máximos diarios del coeficiente de ventilación en cada mes. Para ello, se seleccionó el valor máximo diario del VC en un día, y posteriormente la altura de capa de mezcla y rapidez promedio del viento que le corresponden a ese valor. De esta forma se construyeron tres series de tiempo: una para el coeficiente de ventilación, otra para la altura de capa de mezcla y otra para la rapidez promedio del viento dentro de la PBLH. Cada serie contiene un dato por día correspondiente a su valor máximo del VC. Los resultados presentados en la sección 3.2, incluyen el promedio y la desviación estándar mensuales de los coeficientes de ventilación máximos, así como alturas de capa de mezcla y rapidez del viento correspondientes a los VC máximos.

2.5. Correlación entre VC y los contaminantes

Uno de los objetivos de este trabajo consistió en explorar la correlación entre el coeficiente de ventilación y la concentración de contaminantes. Para esto se usaron los datos calculados del coeficiente de ventilación con el WRF y se compararon con los datos de concentraciones de contaminantes, medidos en el CCA, para el año 2015. Los contaminantes que se usaron en este estudio fueron: ozono, material particulado y monóxido de carbono. Se seleccionó el ozono y el material particulado, debido a que fueron los contaminantes con mayores concentraciones en el Valle de México durante el año 2015. En particular, el ozono superó en seis ocasiones los niveles de precontingencia. En cuanto al material particulado, en 2015, se registró un promedio anual de concentraciones que superó los límites establecidos dentro de la Norma

Oficial Mexicana, para PM_{10} y $PM_{2.5}$ respectivamente. En una ocasión el material particulado alcanzó los niveles necesarios para declarar una precontingencia. Por otro lado, el monóxido de carbono se seleccionó debido a que en las primeras etapas de la investigación, se observó un patrón que indicaba una posible correlación negativa con el coeficiente de ventilación, lo cual se decidió estudiar más a fondo. Cabe resaltar, que este contaminante, de acuerdo a las normas internacionales establecidas por la Organización Mundial de la Salud [12], no alcanzó los niveles en los que representó una amenaza a la salud de los habitantes.

Durante 2015, en la estación del CCA, no se midió la concentración de PM_{10} . Por esta razón, no se consideraron los PM_{10} en el estudio de las correlaciones con el coeficiente de ventilación. Por lo tanto, los contaminantes reportados en este trabajo fueron ozono, $PM_{2.5}$ y monóxido de carbono, y que se muestran en la sección 3.3.

Los meses utilizados en el análisis de correlación corresponden a aquellos que presentaron episodios de precontingencia ambiental; es decir, los meses de marzo, abril, mayo, junio, octubre y diciembre. De estos meses, diciembre es el único donde la precontingencia ambiental fue declarada por altos niveles de material particulado (PM_{10}), el resto fueron por altos niveles de ozono.

2.5.1. Series de tiempo

Se construyeron gráficos con las series de tiempo del coeficiente de ventilación y de la concentración de los tres contaminantes, para cada uno de los meses seleccionados. Se realizó una figura por cada contaminante, mostrando el coeficiente de ventilación, y la concentración de un contaminante en específico. La gráfica resultante permite analizar directamente la variación que hay en cada hora del coeficiente de ventilación y de la concentración de un contaminante en específico. Se obtuvieron gráficos de este tipo, para cada mes, donde se comparó el VC con la serie de tiempo del ozono, de los $PM_{2.5}$ y del monóxido de carbono. Para cada mes se identificaron los días que corresponden a fines de semana con la finalidad de observar efectos de fin de semana, i.e., *weekend effect* [19, 26]. También se identificaron explícitamente las precontingencias, (señaladas con una franja amarilla), en la gráfica que le corresponde al contaminante por la que se activó la precontingencia ambiental [13].

2.5.2. Estudio de correlación

El método utilizado para evaluar las correlaciones entre el coeficiente de ventilación y la concentración de contaminantes, cambió conforme fue avanzando el estudio.

Al principio se realizaron gráficas de correlación entre el coeficiente de ventilación y los contaminantes, y se calculó el coeficiente de correlación o de Pearson, con el objetivo de evaluar si había una correlación lineal entre ambas variables. Sin embargo, el coeficiente de correlación encontrado para los tres contaminantes tuvo valores cercanos a cero, de manera recurrente para todos los meses del año, lo que indicó que este método no permite encontrar la correlación entre el coeficiente de ventilación y los contaminantes. A partir de este resultado, se buscó adoptar otro enfoque que permitiera caracterizar la relación entre el coeficiente de ventilación con la concentración de contaminantes.

La alternativa que se encontró, fue considerar las variables que componen al coeficiente de ventilación al momento de realizar la correlación con los contaminantes, y así poder encontrar algún tipo de patrón e identificar condiciones favorables o adversas para la ventilación. De esta forma, se construyeron gráficos tipo espacio-fase, donde cada coeficiente de ventilación es representado por un punto en el espacio. La altura de capa de límite y la rapidez promedio del viento representan los grados de libertad del sistema. En otras palabras, la ubicación del coeficiente de ventilación es determinada por la altura de capa límite y la rapidez promedio del viento que lo conforman. A partir de la definición del coeficiente de ventilación 2.1, se determinaron todos los posibles valores del coeficiente para el dominio que contiene los puntos a estudiar, los cuales se muestran en las figuras como líneas de contorno o líneas de coeficiente de ventilación constantes (iso-VC).

Finalmente, a cada punto del espacio fase se le asoció la concentración de cierto contaminante, correspondiente al mismo tiempo del VC en cuestión. Los valores de concentración obtenidos para todos los datos se interpolaron al dominio que encierra todos los coeficientes de ventilación del espacio fase, donde las diferentes concentraciones para cada contaminante se representaron con un mapa de colores. De esta forma, la posición del punto en la gráfica indica su valor de VC y sus respectivas altura de capa límite y rapidez del viento, mientras que el mapa de colores indica la concentración del contaminante. De este modo es posible analizar el valor del coeficiente de ventilación asociado a cada concentración del contaminante. Los valores críticos mencionados en la sección 1.4, asociados con condiciones que son propicias al estancamiento del aire, también se muestran explícitamente como referencia [20]. Finalmente, se diferencian los puntos que corresponden a episodios de precontingencia con círculos de color, determinado por la concentración del contaminante asociado a ese punto.

Para este estudio, se realizaron gráficos tipo espacio-fase para cada uno de los

2.5. CORRELACIÓN ENTRE VC Y LOS CONTAMINANTES

meses seleccionados y para cada contaminante. Estas gráficas se muestran en la sección [3.3](#).

Capítulo 3

Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de la caracterización del coeficiente de ventilación y su correlación con las concentraciones de los contaminantes, para la estación del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), en el año 2015. En la primera sección se muestran los promedios mensuales del coeficiente de ventilación obtenidos para cada mes y su relación con los promedios mensuales de la altura de capa de mezcla y la rapidez promedio del viento. En la segunda sección se muestran los promedios mensuales del máximo diario del coeficiente de ventilación y los promedios correspondientes a las variables que componen los máximos del coeficientes de ventilación. Los resultado de la primera y segunda sección se muestran en la tabla 3.1, al final de la sección 3.2.

Finalmente en en la última sección se muestran los resultados de la correlación entre el coeficiente de ventilación y la concentración de los contaminantes, usado las gráficas tipo espacio-fase y las series de tiempo.

3.1. Promedio mensual del VC

Para todos los meses del 2015, se analizó la variación de los promedios mensuales del coeficiente de ventilación (VC), de la altura de capa límite y de la rapidez del viento. En la figura 3.1, en el panel superior, se muestran los promedios mensuales del coeficiente de ventilación, para el 2015. El panel central muestra el promedio mensual de la altura de capa límite (calculada con el modelo) y la parte inferior se muestra el promedio mensual de la magnitud de la rapidez del viento dentro de la capa límite. Para los tres paneles, las sombras grises representan la desviación estándar asociada a cada mes. Todos los datos que se graficaron en la figura 3.1, se muestran en la tabla 3.1.

Se calculó el promedio del VC, de la altura de la capa límite y la rapidez del viento, para todo el 2015, para ser usado como referencia para comparar los promedios mensuales. De esta forma, el coeficiente de ventilación promedio de todo el año fue de $1598 \text{ m}^2/\text{s}$, el promedio de la altura de la de mezcla fue de 692 m y el promedio de la rapidez del viento fue de 2.06 m/s .

A continuación se describen dichos promedios, agrupándolos por temporadas. De esta forma, el siguiente análisis se dividen en

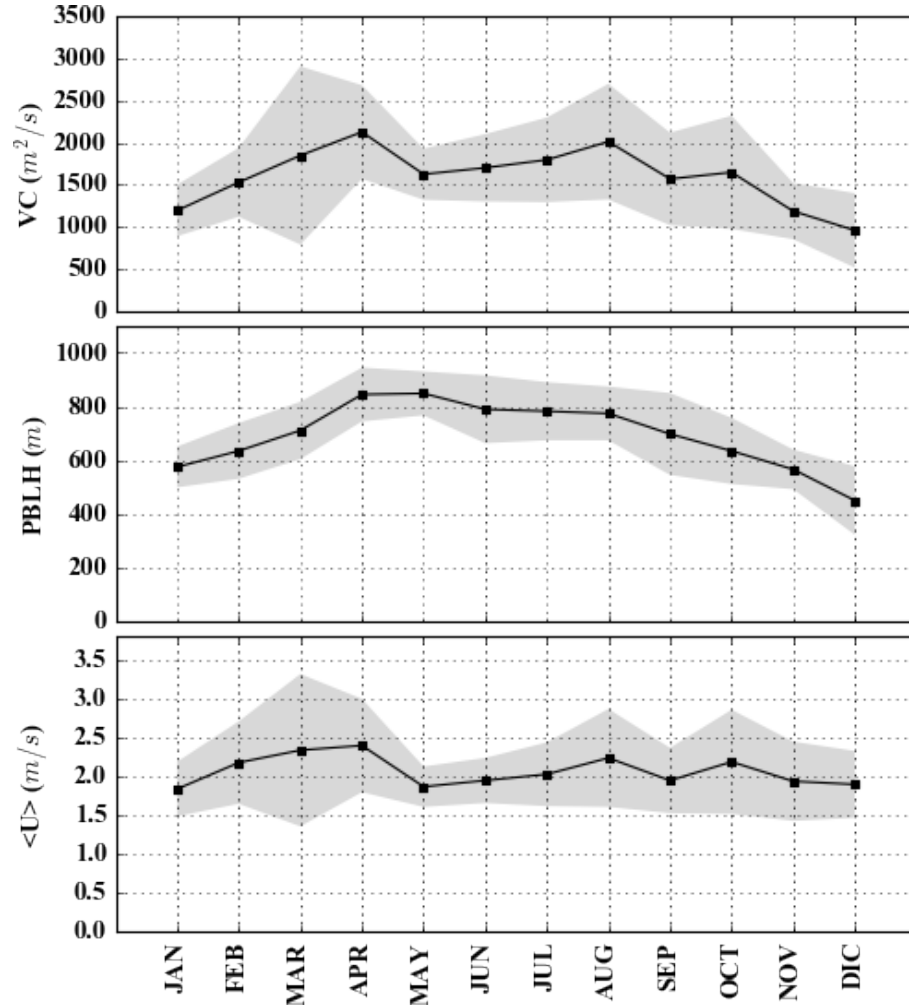


Figura 3.1: Promedios mensuales del coeficiente de ventilación (panel superior), promedios mensuales de la altura de capa de mezcla (panel medio) y promedio mensual de la rapidez promedio dentro de la capa de mezcla (panel inferior), durante el año 2015.

Temporada seca fría

En la temporada seca fría, compuesta por los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre, se observaron los valores del VC promedio más bajos del año. En

particular se aprecia, en la figura 3.1, que diciembre y noviembre son los meses con los VC más bajos del 2015, seguidos por enero y febrero.

En enero se obtuvo un coeficiente de ventilación promedio de $1193 \text{ m}^2/\text{s}$. Se puede apreciar que el valor bajo del VC, se debió a que los promedios de la altura de capa de mezcla y la rapidez del viento, fueron de los más bajos del año. Se puede apreciar que la desviación estándar en enero fue pequeña comparada con los demás meses. En febrero se pudo apreciar que el VC promedio aumentó su valor con respecto a enero, esto se debió a que la altura de capa de mezcla y principalmente la rapidez del viento aumentaron. Debido a que la variabilidad del viento aumentó, también lo hizo el VC.

El coeficiente de ventilación promedio más bajo de la temporada fría y del 2015 se registró para el mes de diciembre, con un promedio de $958 \text{ m}^2/\text{s}$. En cambio, el mes de noviembre registró una altura un VC de $1185 \text{ m}^2/\text{s}$. La rapidez del viento promedio es similar para ambos meses, sin embargo, lo que mejoró la ventilación de noviembre, con respecto a diciembre, fue que la altura de capa de mezcla fue mayor. La variabilidad de los VC es relativamente pequeña en ambos meses. Estos datos, cuantitativamente, se muestran en la table 3.1.

Temporada seca cálida

Durante la temporada seca cálida, compuesta por los meses de marzo y abril, se observaron valores altos del coeficiente de ventilación, comparados con los demás meses (ver figura 3.1).

En particular, durante el intervalo de marzo a abril, se observaron los valores promedio más altos. En los dos meses se puede observar que la rapidez promedio es prácticamente la misma, sin embargo, la altura de la capa límite promedio aumentó en abril, con respecto a marzo. La altura de capa límite y la rapidez del viento fueron las más altas registradas en todo el año. Cabe resaltar que la desviación estándar es la más amplia del año, con una amplitud total cercana a $2000 \text{ m}^2/\text{s}$. Esto indica que el VC tiene variaciones del orden de magnitud del promedio. Particularmente, observando los componentes del VC, se aprecia que la desviación estándar de la PBLH es muy baja y casi mínima; consistente con esta temporada. Ahora bien, la variabilidad de la rapidez promedio es responsable de estas variaciones. No se esperó encontrar variaciones tan grandes del VC y se pudo observar, en las primeras etapas de la investigación, que coinciden con concentraciones altas de contaminantes. Esta fue una de las razones que inspiraron este estudio a explorar las componentes del VC de forma separada. Estos resultados se discuten en la sección 3.3.

En general, durante esta temporada se registraron valores del coeficiente de ventilación por arriba del promedio anual y se registró el valor más alto del año. También se observó que la variación de la ventilación de esta temporada está dominada por el viento.

Temporada de lluvias

A continuación, se describen los mismos resultados, para los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre, correspondientes a la temporada de lluvias.

Durante esta temporada, la altura de capa de mezcla comienza a decrecer debido a que su comportamiento está relacionado con los flujos de calor, debido a que la precipitación genera flujo de calor latente significativo que inhibe el crecimiento de la capa límite. Empezando por el mes de mayo, en la figura 3.1, se puede apreciar que el coeficiente de ventilación crece monótonicamente hasta agosto con una pendiente moderada y a partir de agosto, esta pendiente comienza a decrecer y así continúa por el resto del año. Sin embargo, el VC en éste periodo tiene dos máximos relativos que coinciden con los meses donde la rapidez muestra los mismos máximos relativos, con la diferencia de que las variaciones en rapidez no cambian tanto por debajo de el valor promedio. También es notorio el mínimo relativo para VC durante el mes de septiembre, asociado también a un mínimo relativo en rapidez. Particularmente, en este mes es interesante observar como el promedio de la altura de capa de mezcla es prácticamente igual a la de marzo, sin embargo, debido a que la rapidez promedio del viento fue menor, resulta en un coeficiente de ventilación fuera menor.

En resumen, la temporada de lluvias tiene un coeficiente de ventilación, ligeramente superior al promedio anual, a excepción de septiembre, donde está por abajo. Y se aprecia que en los meses de agosto y octubre, el viento es el que dominan en la ventilación. Los datos de esta sección se muestran en la tabla 3.1.

3.2. Promedio del VC máximo diario

Los promedios mensuales del máximo del coeficiente de ventilación se muestran en la figura 3.2. En el panel superior se muestran los promedios mensuales del máximo VC en cada día, en el panel medio se muestran los promedios mensuales de las alturas de capa de mezcla, asociadas al VC máximo diario, y en el panel inferior se muestran los promedios mensuales de la rapidez del viento, también asociados al VC máximo diario.

De los datos obtenidos para cada mes, se calculó el promedio anual para las tres variables mostradas en la figura 3.2. El promedio anual del máximo VC fue de $5797 \text{ m}^2/\text{s}$, el promedio anual de la capa de mezcla asociada a los VC máximos fue de 1756 m y el promedio anual de la rapidez del viento fue de 3.71 m/s , también asociada a los VC máximos. A continuación se describen los resultados obtenidos para todos los meses de cada temporada.

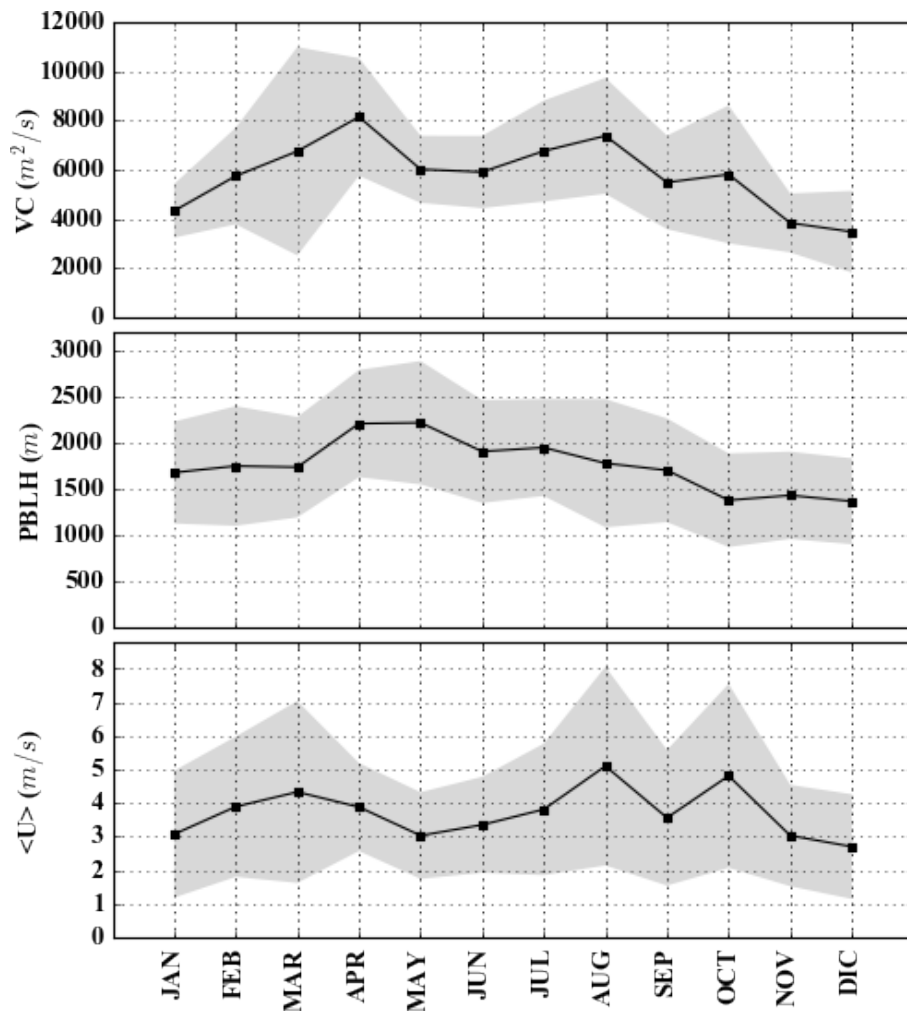


Figura 3.2: Promedios mensuales del coeficiente de ventilación máximo diario, para el 2015. En el panel a la mitad se muestran los promedios mensuales de la altura de capa de mezcla, asociados a coeficiente de ventilación máximo diario. En el panel inferior se muestra la rapidez promedio dentro de la capa de mezcla, también asociado al coeficiente de ventilación máximo diario.

Temporada seca fría

En la figura 3.2, se aprecia que la temporada seca fría (enero, febrero, noviembre y diciembre) es cuando se observaron los valores máximos de VC más bajos del año, en

particular en los meses de enero, noviembre y diciembre. Febrero, en cambio, tiene un promedio del VC máximo diario similar al promedio anual.

Para el mes de enero se obtuvo un promedio de $4322 \text{ m}^2/\text{s}$ para el máximo del VC. Comparándolo con el promedio anual, el valor para enero es bajo. Su altura de capa de mezcla promedio y la rapidez del viento promedio también están debajo del promedio anual.

En febrero se observa que el VC comienza a incrementar con respecto a enero y continua monotónicamente hasta la siguiente temporada. Su promedio obtenido para este mes fue de $5738 \text{ m}^2/\text{s}$, similar al promedio anual. La desviación estándar del máximo del VC fue de $1961 \text{ m}^2/\text{s}$. Se observó que el promedio de la altura de capa de mezcla es prácticamente igual al promedio anual, mientras que el promedio para la rapidez del viento supera al valor del promedio anual.

En los meses de noviembre y diciembre, se puede observar que el promedio del máximo del VC no varía mucho entre estos meses, así mismo sus valores de PBLH y rapidez son también muy similares. En diciembre se obtuvo un promedio del VC de $3471 \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que para noviembre este promedio fue de $3830 \text{ m}^2/\text{s}$, ambos meses por debajo del promedio anual. El promedio de la altura de capa de mezcla, asociada al valor del VC máximo, es similar en ambos meses, por debajo del promedio anual. Con respecto a la rapidez promedio del viento, también se observaron valores bajos. La tabla 3.1, se muestran los datos para esta temporada. Cabe mencionar que cualitativamente el comportamiento es muy similar a los valores promedios.

Temporada seca cálida

En los meses de marzo y abril, se puede apreciar que el coeficiente de ventilación crece monotónicamente comparado con los meses de enero y febrero. En particular, para marzo se obtuvo un coeficiente de ventilación máximo promedio de $6744 \text{ m}^2/\text{s}$, con una amplitud en la desviación estándar asociada de $4231 \text{ m}^2/\text{s}$, la más grande del año, la cual está relacionada a la variación de la rapidez de los vientos. La altura de capa de mezcla para marzo fue parecida al promedio anual, en cambio, la rapidez promedio del viento asociada fue superior al promedio anual. En abril se observó que el VC aumenta con respecto a marzo. Se observó que el promedio del VC máximo fue de $8139 \text{ m}^2/\text{s}$, el cual es el más grande en todo el 2015. Se puede apreciar que la altura de la capa límite es superior a la de marzo, lo cual hace que el coeficiente sea mayor. La rapidez del viento de marzo está arriba del promedio, sin embargo, es menor a la de marzo. En comparación entre ambos meses se observó que la altura de la capa de mezcla creció de marzo a abril, y fue este incremento el que causó

aumento de la ventilación en abril. Esta temporada es un buen ejemplo que muestra un crecimiento monótonico en el VC aún cuando el viento disminuye entre marzo y abril, es decir este coeficiente está compensado por la PBLH sin importar que la rapidez del viento disminuya.

Temporada de lluvias

Los coeficientes de ventilación máximos de los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre, que conforman la temporada de lluvias, se muestran en la figura 3.2. A simple vista se aprecia que los coeficientes de ventilación son más bajos, comparados con la temporada seca cálida, aunque se puede observar que en agosto hay un repunte en la ventilación. En cambio, en el mes de septiembre y octubre el disminuyó.

Para mayo, se obtuvo un promedio del coeficiente de ventilación máximo diario de $6010 \text{ m}^2/\text{s}$. El promedio de la altura de capa de mezcla asociada al promedio del VC estuvo arriba del promedio, y fue similar al obtenido en abril. En cambio, el promedio de la rapidez del viento disminuyó con respecto a abril, lo que indica que el coeficiente de ventilación en mayo fue menor, debido a que la magnitud del viento decreció durante este mes.

El mes de junio se obtuvo un promedio del VC máximo muy similar al de mayo. Éste fue de $5901 \text{ m}^2/\text{s}$, con una desviación estándar de $1467 \text{ m}^2/\text{s}$. El promedio de la altura de capa de mezcla fue de 1904 m y el promedio de la rapidez del viento fue de 3.35 m/s . Vale la pena resaltar que el promedio de la altura de capa de mezcla decreció con respecto al promedio de mayo, sin embargo, el promedio de la rapidez del viento aumentó. Este balance hizo que el promedio del VC se mantuviera igual que el VC de mayo.

Para el mes de julio se observa que el VC empieza a crecer con respecto a junio. El VC correspondiente a este mes fue de $6752 \text{ m}^2/\text{s}$, con una desviación estándar de $2048 \text{ m}^2/\text{s}$. La altura de capa de mezcla asociada al promedio del VC registrada fue de 1947 m y su promedio de la rapidez fue de 3.81 m/s . En el panel de en medio de la figura 3.2, se puede ver que las alturas de capa de mezcla para julio son iguales a las de junio, sin embargo, el promedio de la rapidez del viento supera al de junio, lo que incrementa el valor promedio del VC en julio.

El mes de agosto presenta un máximo del VC para la temporada de lluvias. Se observó que el promedio del VC máximo diario fue de $7371 \text{ m}^2/\text{s}$, con una desviación estándar de $2355 \text{ m}^2/\text{s}$. El promedio de la altura de capa de mezcla observado fue de 1777 m y el promedio de la rapidez del viento, asociado al máximo del VC fue de

5.1 m/s . El promedio de los vientos de agosto, fue de el más alto de todo el año, lo que hizo que el coeficiente de ventilación en agosto fuera alto.

El promedio del VC máximo diario decrece para el mes de septiembre, alcanzando un promedio de $5478 m^2/s$, el más bajo de la temporada de lluvias. La desviación estándar para el VC es de $1899 m^2/s$. Para el promedio de la altura de capa de mezcla asociada al VC máximo, se obtuvo un valor de $1700 m$, ligeramente por debajo del promedio anual. El promedio de la rapidez fue de $3.56 m/s$, se puede observar que ésta decrece considerablemente, con respecto a los promedio de agosto y octubre.

Finalmente, para octubre se obtuvo un promedio del máximo diario del coeficiente de ventilación de $5803 m^2/s$, con una desviación estándar de $2801 m^2/s$. El promedio de la altura de capa de mezcla fue de $1376 m$, prácticamente igual al de diciembre. Por otro lado, en el promedio de la rapidez del viento se aprecia un repunte con respecto a septiembre, el valor obtenido fue de $4.81 m/s$, el cual es el segundo más alto del año.

En resumen, el coeficiente de ventilación máximo promedio en esta temporada, creció de junio a agosto, y decreció de agosto a octubre. Los dos máximos relativos observados en agosto y octubre se debieron a un aumento en la rapidez del viento.

3.3. Correlación de VC con contaminantes

En esta sección se describen las gráficas de las series de tiempo del coeficiente de ventilación y las gráficas tipo espacio-fase, correspondientes a cada contaminante, para los meses de marzo, abril, mayo, junio, octubre y diciembre. En el análisis de las series de tiempo, se enfatizó en el mes de mayo, debido a que presentó el mayor número de episodios de precontingencias de todo el 2015. Con base en esta descripción, se exponen de manera general las gráficas del resto de los meses seleccionados, resaltando las principales similitudes y diferencia encontradas con las series de mayo. Finalmente, se describen las gráficas tipo espacio-fase, agrupándolas según el contaminantes que tienen asociado.

3.3.1. Series de tiempo

En la figura 3.5 se muestran las series de tiempo del ozono, $PM_{2.5}$ y del monóxido de carbono, para el mes de mayo. En el panel superior de la figura 3.5 se puede apreciar la comparación de las series de tiempo del VC y de las concentraciones

Temporada	Mes	VC_{avg} (m^2/s)	$PBLH_{avg}$ (m)	U_{avg} (m/s)	VC_{max} (m^2/s)	$PBLH_{max}$ (m)	U_{max} (m/s)
Seca fría	Enero	1193.86	574.58	1.83	4322.24	1676.08	3.07
	Febrero	1527.6	634.39	2.17	5738.21	1747.08	3.89
Seca cálida	Marzo	1845.96	710.67	2.33	6744.23	1734.47	4.33
	Abril	2124.23	844.71	2.39	8139.48	2207.11	3.88
Lluvias	Mayo	1623.6	848.71	1.86	6010.35	2216.56	3.03
	Junio	1699.87	789.72	1.94	5901.1	1904.73	3.35
	Julio	1794.26	782.28	2.02	6752.58	1947.22	3.81
	Agosto	2009.81	774.11	2.23	7371.68	1777.22	5.1
	Septiembre	1567.84	697.49	1.94	5478.37	1700.88	3.56
	Octubre	1646.08	634.26	2.18	5803.9	1376.36	4.81
Seca fría	Noviembre	1185.76	565.6	1.93	3830.59	1429.26	3.03
	Diciembre	958.15	449.62	1.89	3471.42	1364.71	2.7

Cuadro 3.1: Promedios mensuales descritos en las secciones 3.1 y 3.2. El subíndice *avg* denota los promedios de todo el mes de la sección 3.1, mientras que el subíndice *max* denota el promedio de los máximos diarios descritos en la sección 3.2.

de ozono. En este panel, se puede observar que ambas series tienen un ciclo diario parecido, en el que ambas crecen durante el día y en la noche decrecen a valores cercanos a cero. Asimismo, en ambas series de tiempo se puede apreciar que, durante el día, en donde ambas series alcanzan el máximo diario, se observa que existe un desfase temporal entre los máximos del VC y los máximos del ozono. Es decir, cuando la concentración de ozono alcanza su máximo, el coeficiente de ventilación sigue desarrollándose, y cuando el VC alcanza el máximo, la concentración de ozono disminuye. En particular, esto se puede apreciar durante la precontingencia del 5 de mayo, donde a las 15:00 horas se registró una concentración de ozono de 145 ppb y un coeficiente de ventilación de $3800 \text{ m}^2/\text{s}$. Conforme fue avanzando el día se pudo apreciar que la concentración de ozono disminuyó mientras el VC aumentó. A las 16:00 horas el ozono disminuyó a 116 ppb mientras que el VC aumentó a $4067 \text{ m}^2/\text{s}$. A las 17:00 horas, la concentración de ozono continuó disminuyendo, con un valor de 69 ppb, mientras el VC alcanzaba su máximo diario con un valor de $5288 \text{ m}^2/\text{s}$. A partir de las 18:00 el VC empezó a decrecer alcanzando un valor de $1962 \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que la concentración del ozono decreció a 35 ppb.

En el segundo día de la primera precontingencia, el 6 de mayo, se observó de nuevo un desfase entre ambos máximos, sin embargo, el ozono no alcanzó niveles tan altos como durante el 5 de mayo. A las 14:00 horas las concentraciones de ozono alcanzaron el máximo diario, con un valor de 97 ppb, y a la misma hora, el VC registró un valor de $2898 \text{ m}^2/\text{s}$. A las 15:00 horas el VC alcanzó su máximo diario con un valor de $6822 \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que las concentraciones de ozono disminuyeron a 80 ppb. A partir de esta hora, ambas series de tiempo decrecieron hasta llegar a niveles cercanos a cero en la noche.

En la segunda precontingencia de mayo se pudo observar nuevamente el desfase entre ambas series de tiempo. Durante el 9 de mayo, se registró el máximo de ozono a las 16:00 horas, con una concentración de 156 ppb, mientras que el VC registró un valor de $4019 \text{ m}^2/\text{s}$. En cambio, para el mismo día, el máximo de del VC se registró a las 18:00 horas, con un valor de $6908 \text{ m}^2/\text{s}$. La concentración registrada de ozono para la misma hora fue de 59 ppb.

En la serie de tiempo del monóxido de carbono (CO), mostrada en la parte media de la figura 3.5, se puede apreciar que el CO tiene un ciclo diario que también está desfasado por algunas horas con el VC. En particular se observa que las emisiones de CO alcanzan su máximo durante la mañana, y conforme el VC crece, la concentración de CO empieza a decaer. Esto sugiere que hay una correlación negativa entre el coeficiente de ventilación y la concentración de CO. Cabe resaltar que las emisiones

del CO no superaron los límites establecidos de la Norma Oficial Mexicana, en ningún momento del 2015, por tanto, no representan una amenaza a la salud de los habitantes del Valle de México.

En el panel inferior de la figura 3.5 se puede apreciar la comparación entre el coeficiente de ventilación con la concentración de $PM_{2.5}$. A diferencia de las series de ozono y monóxido de carbono, en esta serie es menos evidente reconocer algún tipo de patrón que indique una posible relación con el coeficiente de ventilación. Para los primeros días del mes, del primero al 6 de mayo, se aprecia que las concentraciones de $PM_{2.5}$ se mantienen relativamente constantes a pesar de que el VC cambia. Sin embargo, se puede apreciar que existen días, en donde el pico máximo de VC coincide con una reducción en la concentración de los $PM_{2.5}$, en particular en los días 7, 8, 13, 18, 21 y 26 de mayo. También, se aprecia que existen días en donde el aumento del VC coincide con un aumento en las concentraciones del contaminante, en particular se observa esto para el 16 de mayo. Finalmente, se puede observar en esta gráfica que la concentración nocturna de los $PM_{2.5}$ no está influenciada por la variación diaria del coeficiente de ventilación, pues en muchos de los días se observa que no cambian su concentración cuando el VC decrece.

Cabe mencionar, que no se observó una diferencia clara en las concentraciones de ozono, monóxido de carbono, ni de $PM_{2.5}$, durante los fines de semana del mes de mayo (marcado en las figuras por las sombras grises).

A continuación se describen los meses restantes señalando las similitudes y diferencia observadas con respecto al mes de mayo. Los meses restantes se muestran en la figuras 3.3, 3.4, 3.6, 3.7, 3.8.

En las en las gráficas correspondientes al ozono (paneles superiores), se observó que las series de tiempo de la concentración de ozono presentan un ciclo diario similar al del coeficiente de ventilación, donde ambas series caen a valores cercanos a cero durante la noche. En los periodos de precontingencia aprecia que las altas concentraciones registradas están relacionadas con coeficientes de ventilación bajos, o a coeficientes de ventilación bajos durante las primeras horas de la tarde. En algunos días se pudo apreciar que existe un desfase entre el tiempo de ocurrencia del máximo entre ambas series, es decir que el ozono alcanza su máximo antes que el VC y empieza a decrecer cuando el VC alcanza su máximo. A pesar de esto, se pueden observar días en donde altas concentraciones de ozono, coinciden con niveles altos de ventilación, aunque son pocos los episodios donde esto ocurre.

Para las series de monóxido de carbono del resto de los meses, se puede apreciar que existe un desfase entre la ocurrencia de los máximos entre la serie del CO y la

serie del VC. En la mayoría de los días, prevalece el escenario donde la concentración del CO alcanza el máximo de concentración cuando el VC está desarrollándose, y cuando el VC alcanza el máximo es cuando la concentración de CO disminuye. Los niveles de CO, en los seis meses analizados, no superan los niveles establecidos por la Norma Oficial Mexicana, por lo que no representaron una amenaza para la salud de las personas.

En los paneles inferiores de las figuras del resto de los meses, se pueden apreciar las series de tiempo de los $PM_{2.5}$. De igual forma que en mayo, no se puede apreciar que las concentraciones sigan un ciclo diario como en las series de tiempo de ozono y monóxido de carbono. A pesar de esto, se puede observar que en los meses analizados prevalece el escenario en donde los días con bajas concentraciones de $PM_{2.5}$ corresponden con coeficientes de ventilación altos. Sin embargo, existen días donde se registró un VC alto que coinciden con niveles altos de concentración de $PM_{2.5}$, por ejemplo, en el mes de junio se pudo observar varios días así. En general, a simple vista no es evidente reconocer un patrón que sugiera que existe una correlación entre ambas series.

Finalmente, para los fines de semana para de todos los meses, no fue posible observar una reducción o aumento claro en las concentraciones de ozono, $PM_{2.5}$ o monóxido de carbono. Al parecer, las concentraciones durante los fines de semana siguen la tendencia de los días que los preceden.

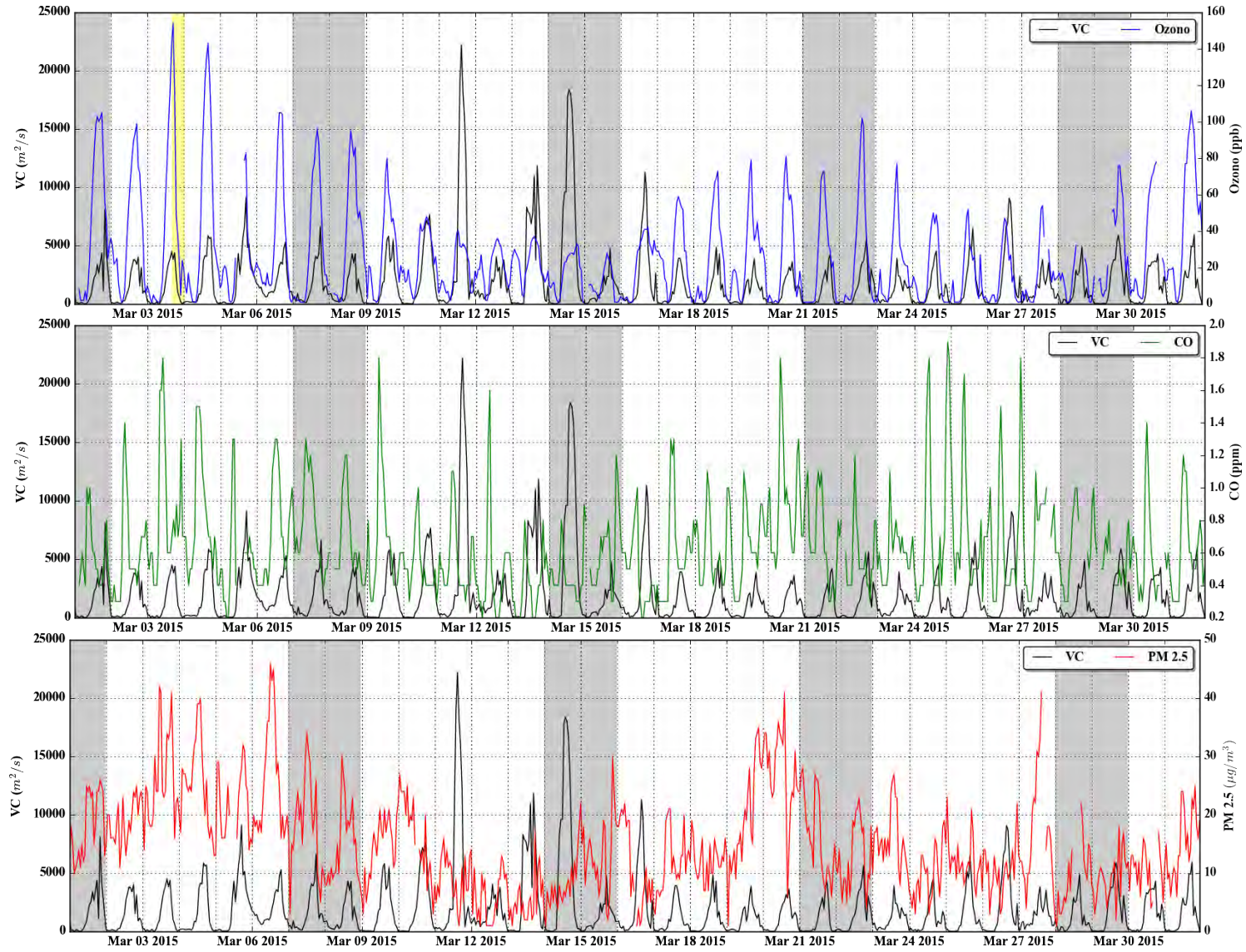


Figura 3.3: Series de tiempo horarias para el mes de marzo, del valor coeficiente de ventilación contra los contaminantes: O_3 , CO y $PM_{2.5}$.

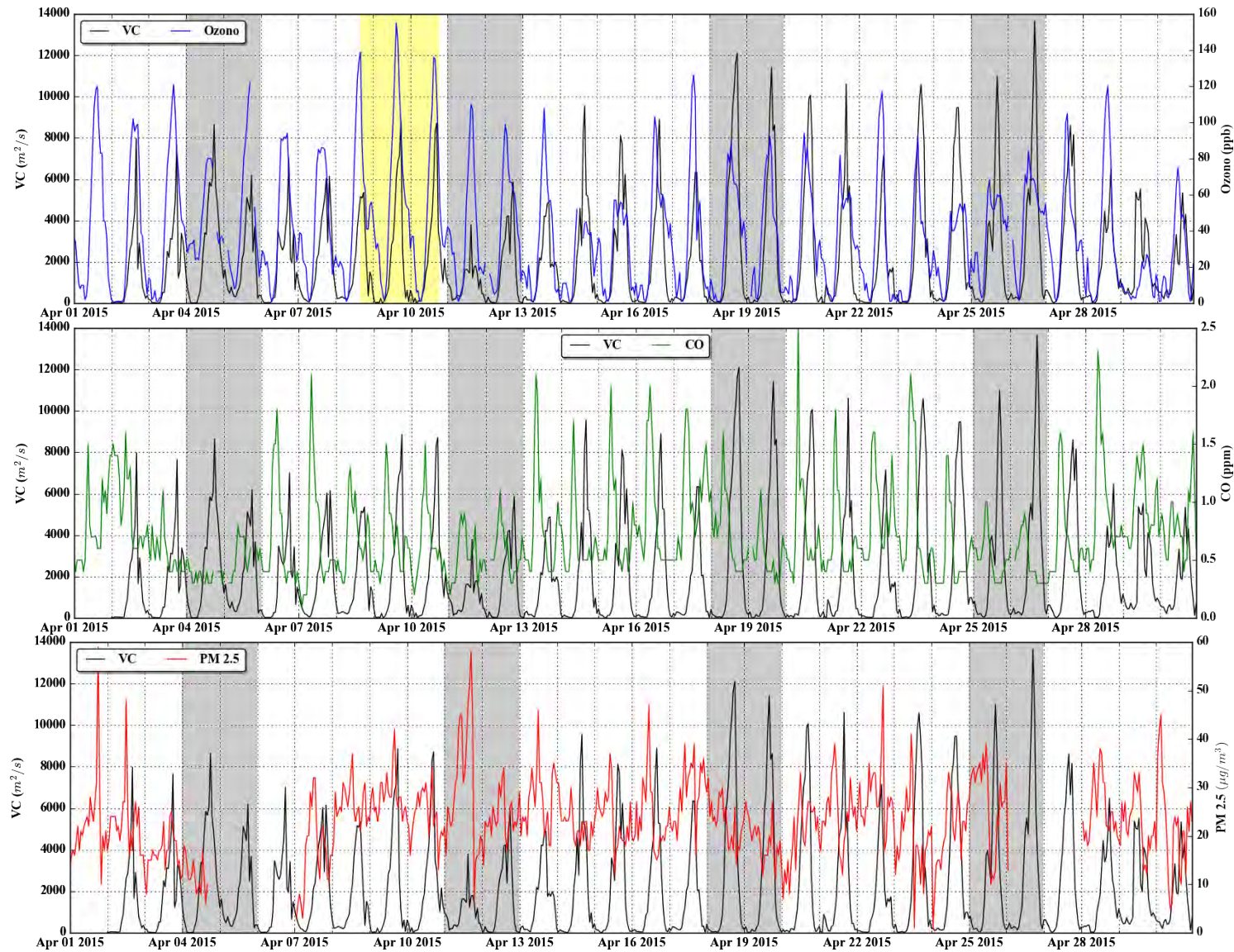


Figura 3.4: Series de tiempo horarias para el mes de abril, del valor coeficiente de ventilación contra los contaminantes: O₃, CO y PM_{2.5}.

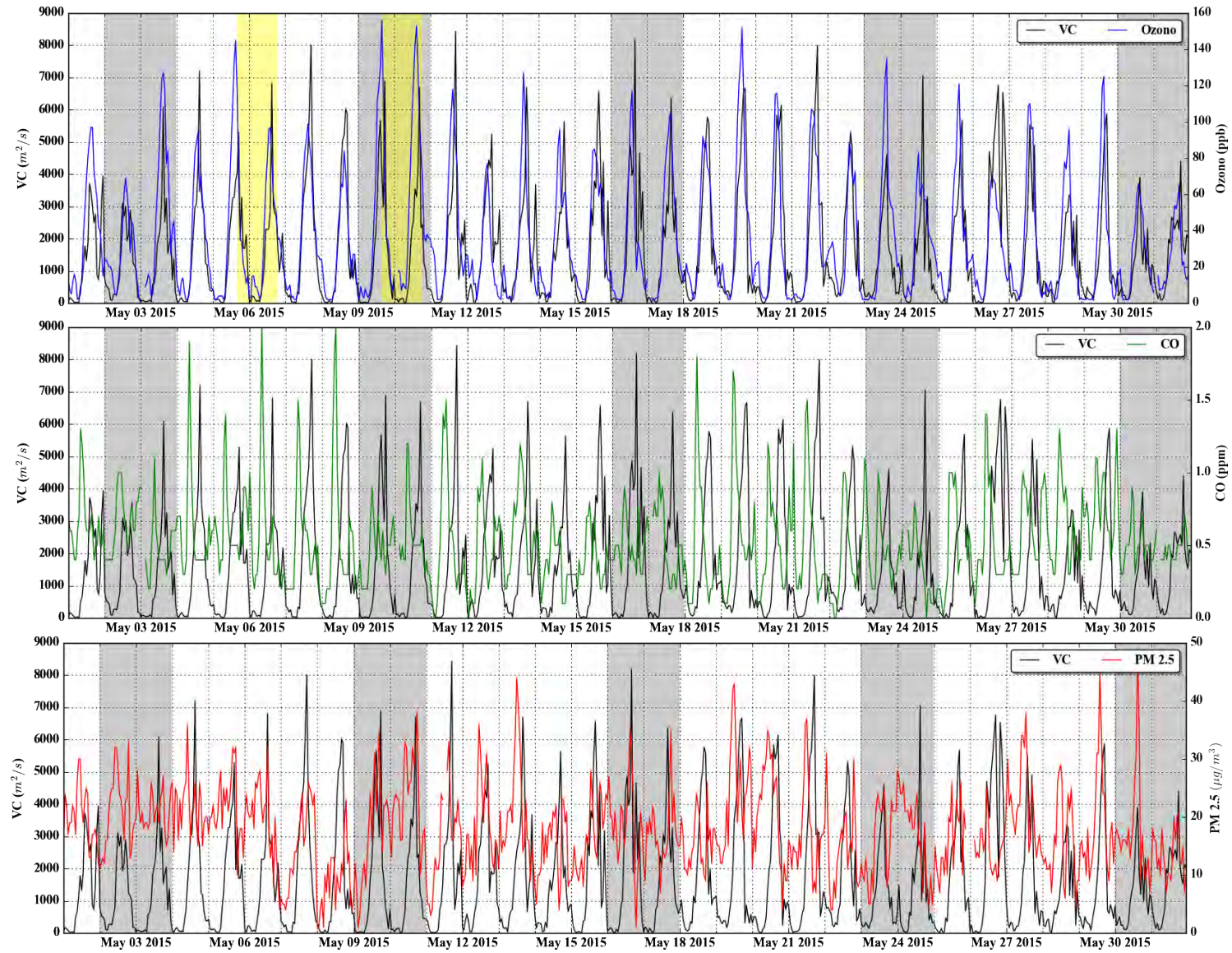


Figura 3.5: Series de tiempo horarias para el mes de mayo, del valor coeficiente de ventilación contra los contaminantes: O_3 , CO y $PM_{2.5}$.

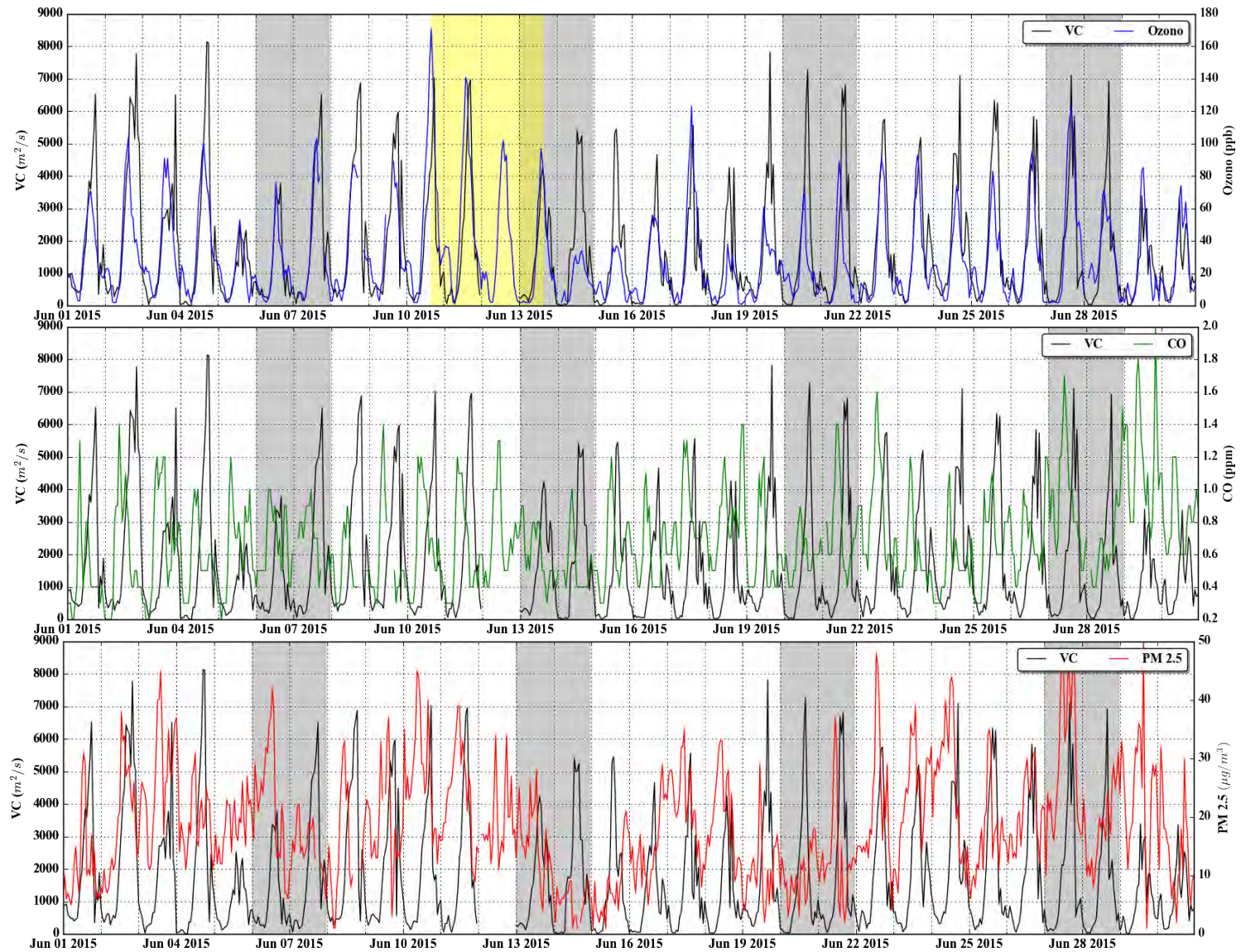


Figura 3.6: Series de tiempo horarias para el mes de junio, del valor coeficiente de ventilación contra los contaminantes: O₃, CO y PM_{2.5}.

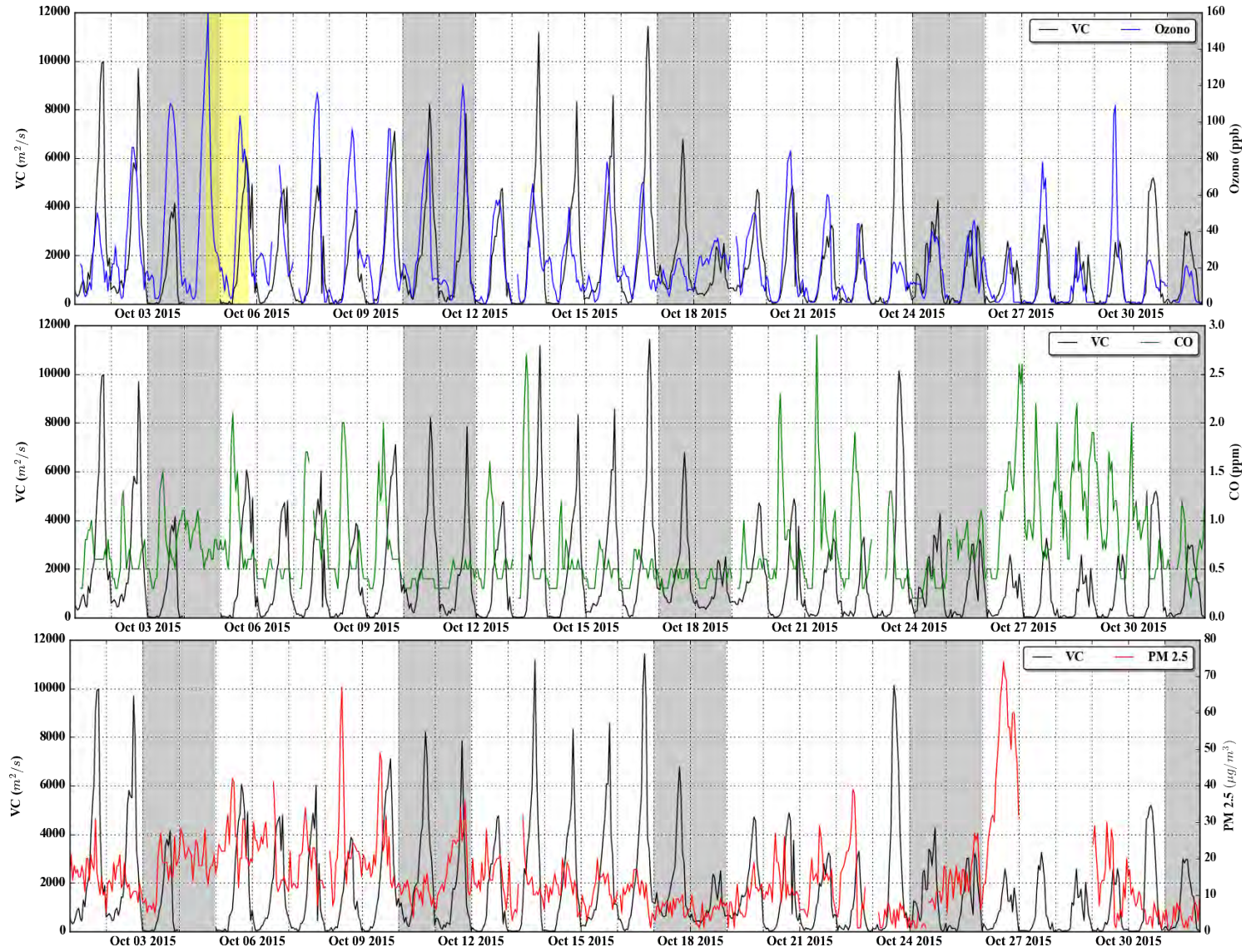


Figura 3.7: Series de tiempo horarias para el mes de octubre, del valor coeficiente de ventilación contra los contaminantes: O_3 , CO y $PM_{2.5}$.

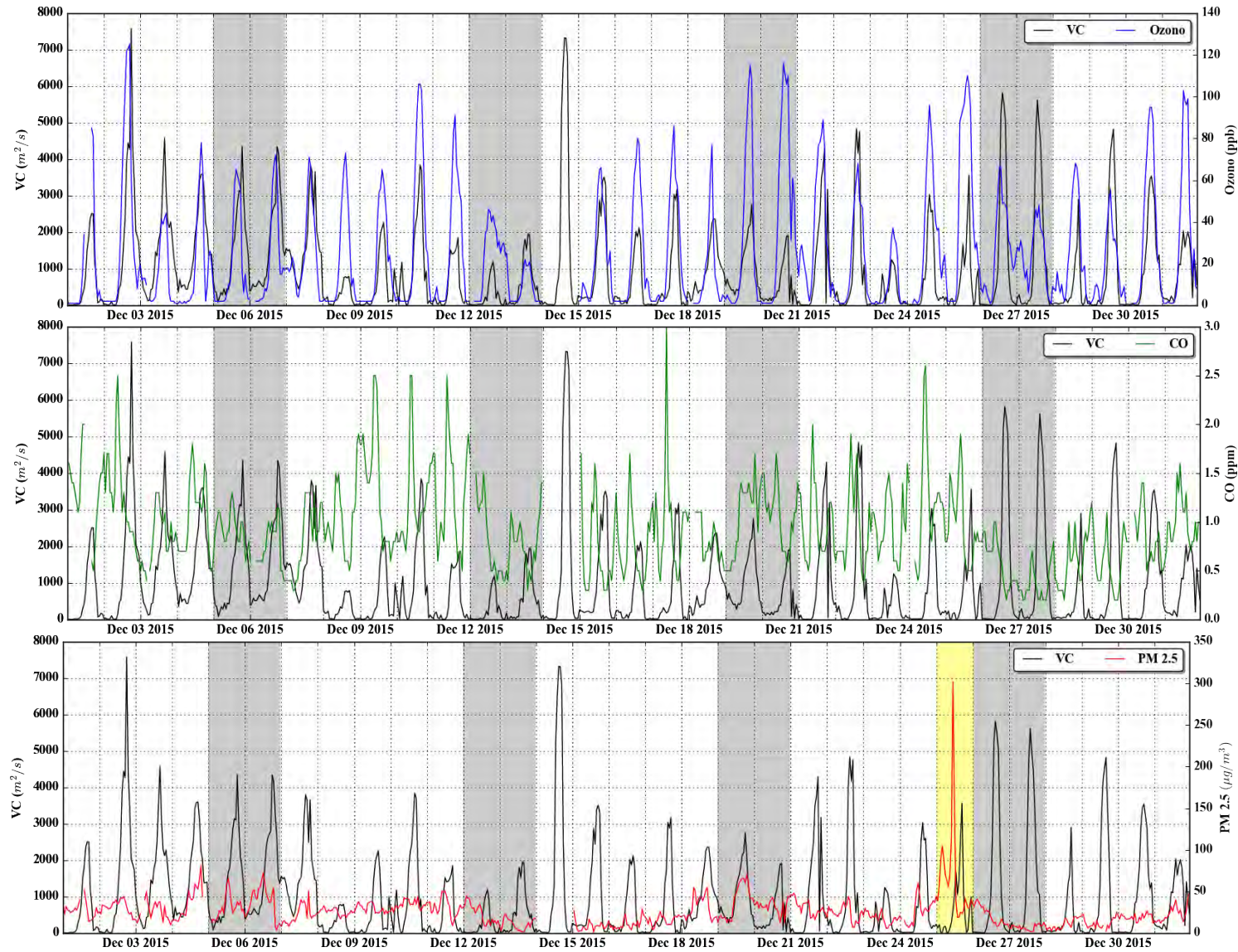


Figura 3.8: Series de tiempo horarias para el mes de diciembre, del valor coeficiente de ventilación contra los contaminantes: O₃, CO y PM_{2.5}.

3.3.2. Gráficas tipo espacio fase

Como se explicó en la metodología, en las figuras tipo espacio-fase se graficaron cada punto de la serie del VC, donde sus coordenadas espaciales corresponden a las variables que conforman al coeficiente. Cada punto del espacio fase se asoció con la concentración de cierto contaminante correspondiente a la misma hora. Cuando en alguna de las series de tiempo faltó un valor, el punto no se incluye en el espacio fase. La colección de puntos, con sus valores de contaminación asociados, se interpolaron linealmente a un mapa de colores que abarca todos los los puntos de la gráfica. El color del mapa indica la concentración de contaminantes, señalado por la barra de colores en el margen derecho de la gráfica.

Se agruparon las gráficas por contaminante en común, es decir, en una figura se muestran todos los meses seleccionados para ozono, en la siguiente para los $PM_{2.5}$ y en la tercera para el monóxido de carbono. Las gráficas se distinguen por la abreviación del mes localizada en la esquina superior derecha de cada gráfica. También, se resaltó la curva correspondiente a los $6000 m^2/s$ y la línea que representa los puntos con rapidez constante de $4 m/s$, conforme a los criterios para determinar escenarios de buena ventilación, mencionados en la sección 1.4.

La posición de los puntos en el espacio fase dan información sobre las variables que dominan en la ventilación, que son la altura de capa de mezcla (PBLH) y rapidez del viento (U). De esta forma se pueden identificar cuatro principales regiones en el espacio fase: La región dominada por PBLH (esquina inferior derecha), la región dominada por U (esquina superior izquierda), la región donde el VC es bajo (esquina inferior izquierda) y la región donde el VC es alto (esquina superior derecha).

Ozono

En la figura 3.9 se muestran todas las gráficas tipo espacio-fase de ozono de los meses de marzo, abril, mayo, junio, octubre y diciembre. En las seis gráficas, se aprecia que existen regiones donde predominan distintas concentraciones de ozono. En particular, se aprecia que en la esquina inferior derecha de las gráficas, donde PBLH supera los $1000 m$ y la rapidez del viento es inferior a los $4 m/s$, se encuentran las zonas de máxima concentración de ozono, con valores por arriba del límite de los 95 ppb, según la NOM.

Por otra parte, en la región dominada por el viento (esquina superior izquierda), donde PBLH es inferior a los $1000 m$ y la rapidez del viento supera los $4 m/s$, se puede apreciar que existen zonas de concentración de ozono que no superan los

50 ppb, a pesar de que se tengan coeficientes de ventilación menores a $6000 \text{ m}^2/\text{s}$. Cabe resaltar, que en los meses de abril, mayo y junio, se puede observar que existen algunos puntos, correspondientes a las precontingencias, que caen dentro de esta región, sin embargo, se observa que son eventos asilados, debido a que la mayoría de los puntos en esa región no presenta las mismas concentraciones.

En la esquina inferior izquierda, se observa que se agrupan gran cantidad de puntos donde el VC es inferior a los $1000 \text{ m}^2/\text{s}$ y coincide con las concentraciones más bajas del mes. Esto se le atribuye al hecho de que el ciclo del VC y el ozono alcanzan sus mínimos durante la noche, lo que se refleja en esta región, donde la densidad de puntos es grande y todos tienen una concentración baja de ozono.

Para la región donde el coeficiente de ventilación es alto, donde supera los $6000 \text{ m}^2/\text{s}$ y la rapidez del viento es superior a $4 \text{ m}/\text{s}$, se puede observar que las concentraciones son inferiores a los 95 ppb, en las gráficas de los seis meses analizados. Aunque cabe resaltar, que en los meses de mayo, junio y diciembre se observa que hay pocos puntos en esta región, mientras que marzo, abril y octubre, presentan mayor número de puntos. Sin embargo, esto sugiere que dichos criterios sirven que determinar episodios de estancamiento de aire. También las gráficas espacio-fase muestran que la ventilación del ozono es dominada por el viento y no por la altura de la capa límite.

PM_{2.5}

Las gráficas tipo espacio-fase asociadas a los PM_{2.5}, se muestran en la figura 3.10. A simple vista es difícil reconocer un patrón, que se repita en las seis gráficas, y que indique las zonas en donde se agrupan las concentraciones máximas de este contaminante. Sin embargo, se aprecia que en general las concentraciones máximas de PM_{2.5} se localizan por debajo de la línea de $4 \text{ m}/\text{s}$, a excepción de un valor de $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registrado en junio, donde se supera los $4 \text{ m}/\text{s}$ y se encuentra prácticamente sobre la curva de los $6000 \text{ m}^2/\text{s}$.

En la región inferior izquierda de las gráficas, donde los coeficientes de ventilación son menores a $1000 \text{ m}^2/\text{s}$, se observa que predominan las concentraciones bajas de PM_{2.5}, con respecto al límite de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido por la NOM. Sin embargo, en diciembre se puede apreciar que durante el episodio de precontingencia, la concentración más alta, se alcanzó cuando el VC era menor a los $1000 \text{ m}^2/\text{s}$, y conforme fue aumentando el VC, su concentración disminuyó hasta llegar a valores por abajo del límite de la NOM.

Según los criterios señalados por las líneas rojas para determinar episodios de

3.3. CORRELACIÓN DE VC CON CONTAMINANTES

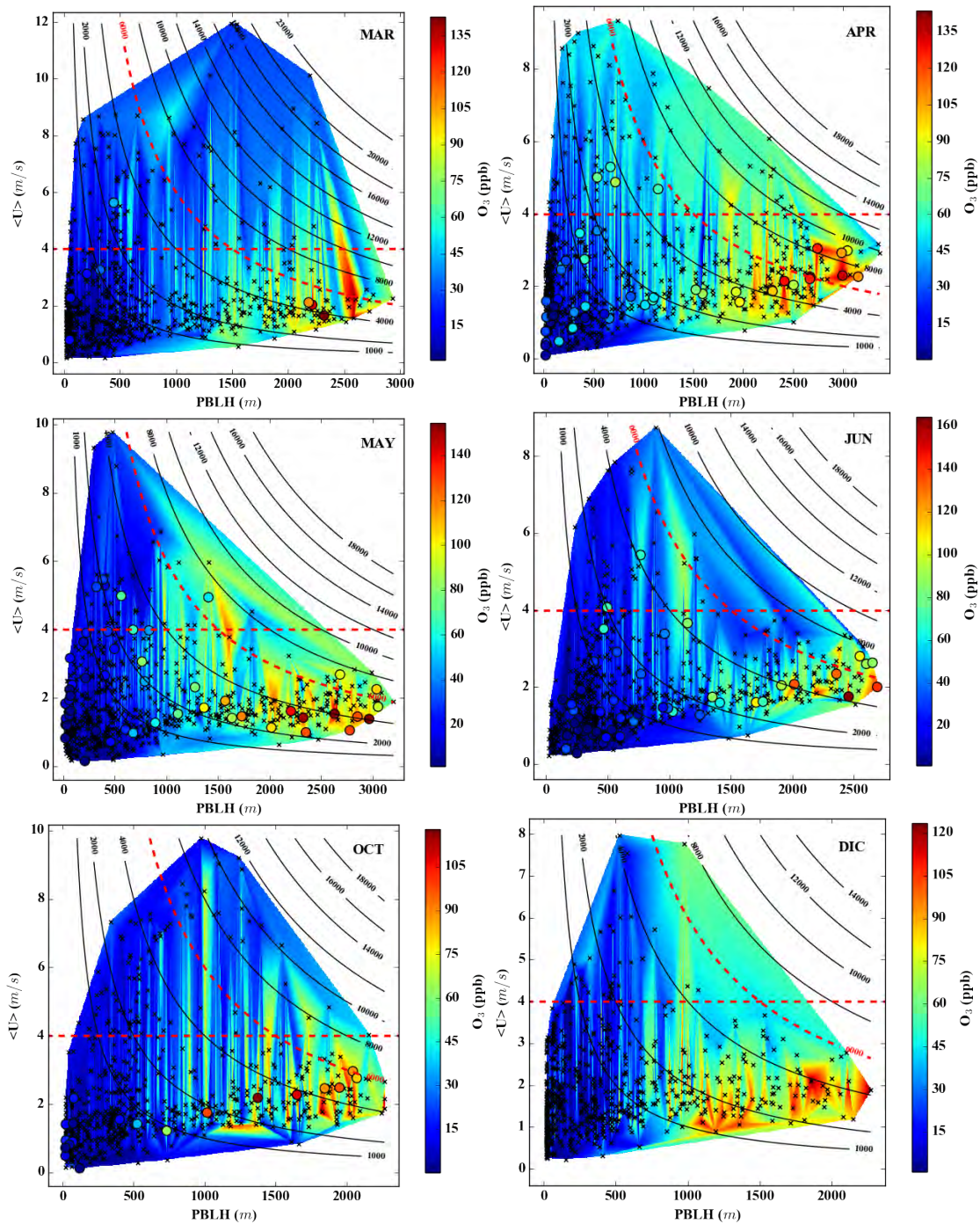


Figura 3.9: Gráficas tipo espacio-fase para el ozono, pertenecientes a los meses de marzo, abril, mayo, junio, octubre y diciembre.

buena ventilación, se aprecia que no hay concentraciones que superen los $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en los puntos que se encuentra por arriba de estos límites, lo cual sugiere que el criterio sirve para los $\text{PM}_{2.5}$. No obstante, debido a que los puntos con concentraciones cercanas a los $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se hayan muy dispersos en el dominio, no es posible determinar cual variable es la que domina en la ventilación de los $\text{PM}_{2.5}$.

Monóxido de carbono

En la figura 3.11, se puede apreciar las gráficas tipo espacio-fase para el monóxido de carbono. En ellas se observa que las concentraciones más altas de CO se encuentran en la región donde el coeficiente de ventilación es menor a $2000 \text{ m}^2/\text{s}$, principalmente cuando el viento es menor a $4 \text{ m}/\text{s}$ y la altura de capa de mezcla no supera los 1000 m .

Cuando el coeficiente de ventilación es alto, arriba de los $6000 \text{ m}^2/\text{s}$, se aprecia que las concentraciones del CO son bajas, salvo por algunos eventos aislados.

No se registraron concentraciones de CO que superarán los 11 ppm, para el 2015. Cabe mencionar que cuando se hace alusión a las concentraciones «más altas» del monóxido de carbono en el análisis de las gráficas de espacio-fase, por lo general se hace alusión a concentraciones que rondan los 2 ppm, lo cual no representa una amenaza para la salud de las personas. Sin embargo, es necesario ver como se comporta el CO en concentraciones altas, para poder sacar conclusiones de escenarios que son más relevantes para los habitantes del Valle de México.

3.3. CORRELACIÓN DE VC CON CONTAMINANTES

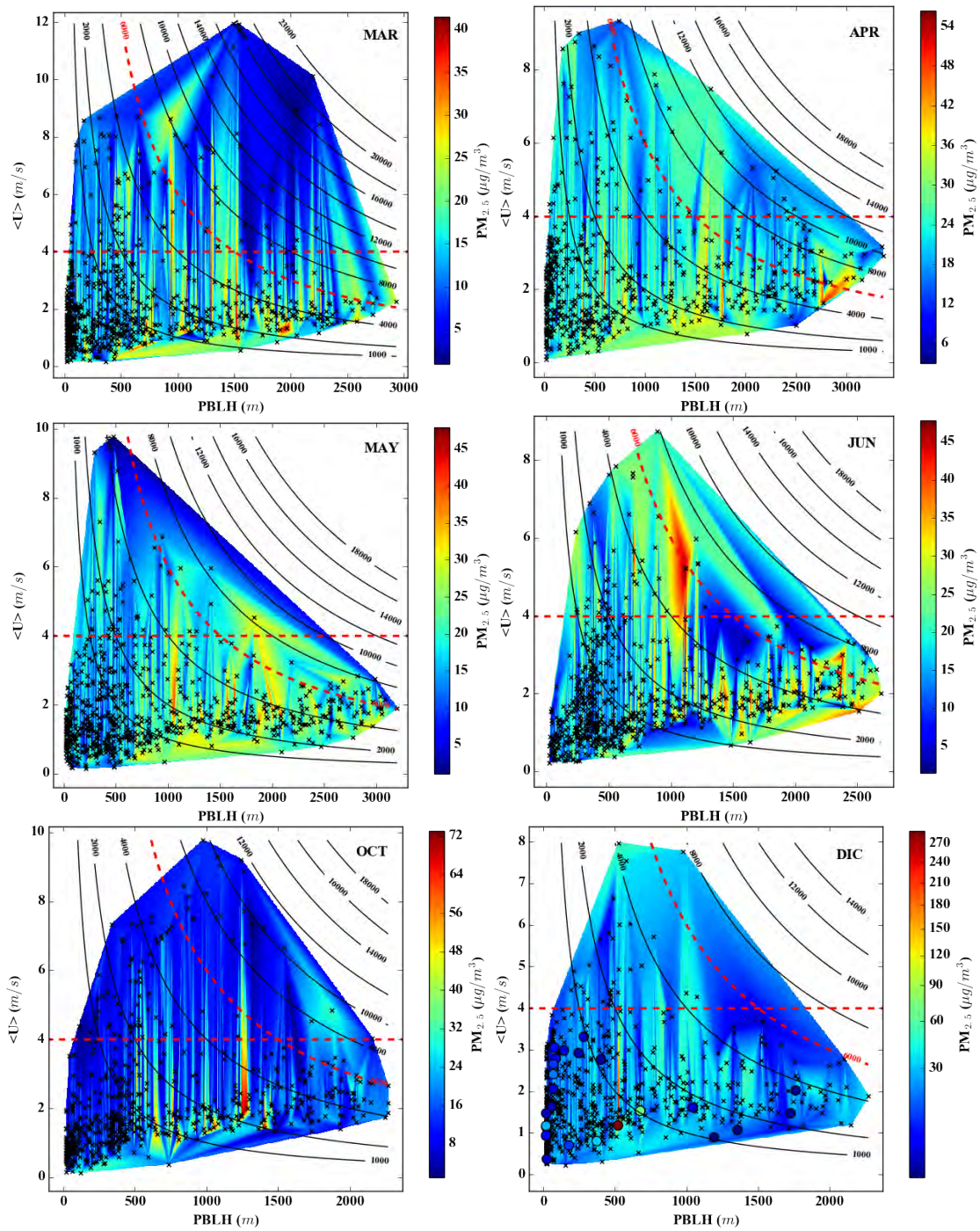


Figura 3.10: Gráficas tipo espacio-fase para los $PM_{2.5}$, pertenecientes a los meses de marzo, abril, mayo, junio, octubre y diciembre.

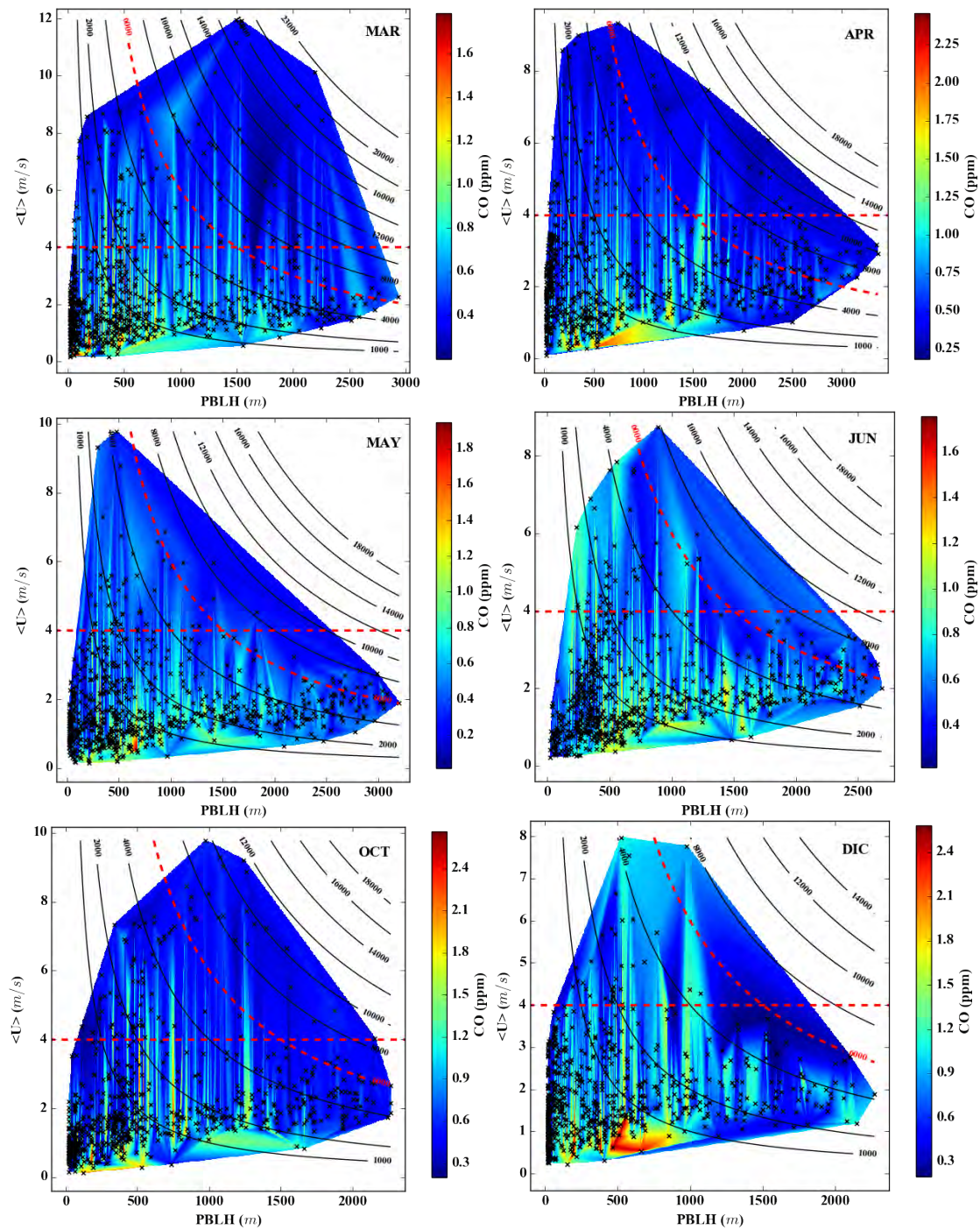


Figura 3.11: Gráficas tipo espacio-fase para el monóxido de carbono, pertenecientes a los meses de marzo, abril, mayo, junio, octubre y diciembre.

Capítulo 4

Conclusión

Como se revisó a lo largo de esta tesis, la contaminación en el Valle de México es un fenómeno complejo que involucra muchos factores que afectan en la calidad del aire. Esta tesis se centró en el estudio de la influencia de los factores meteorológicos, principalmente la altura de la capa de límite y la rapidez del viento, en la contaminación del aire.

En la validación realizada de la altura de la capa límite con respecto a mediciones hechas con un ceilómetro, mostrada en el apéndice [A](#), se pudo observar que el WRF subestima la altura de la capa límite durante la noche, para todos los meses del 2015. Lo que sugiere que el esquema YSU PBL no resuelve la capa residual ni la capa límite estable nocturna, las cuales se desarrollan durante la noche. Para el ciclo diurno, se pudo observar que la peor temporada en la que el modelo estima la altura de capa límite, fue en la seca fría, debido a que se aprecia una diferencia sustancial entre las alturas máximas estimadas por el modelo y las medidas por el ceilómetro. En cambio, los mejores meses en los que el modelo estimó la altura de la capa límite fueron abril, mayo y agosto, puesto que las alturas máximas del WRF y del ceilómetro son prácticamente iguales.

En la caracterización del coeficiente de ventilación hecha para el CCA, para todo el 2015, se observó que el mes con el coeficiente más alto de ventilación fue abril, donde se registró un promedio del máximo de $8139 \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que el mes con el coeficiente de ventilación más bajo fue diciembre, donde su promedio del máximo fue de $3471 \text{ m}^2/\text{s}$. Se observó que para los meses de febrero, marzo, agosto y octubre, el coeficiente de ventilación máximo está dominando por la rapidez del viento, y para los meses de abril y mayo, la altura de la capa límite es la que domina en el coeficiente de ventilación. En los meses de enero, septiembre, noviembre y diciembre se observan valores bajos en la rapidez del viento y en la altura de capa límite, con

respecto a los otros meses.

Finalmente, se hizo un análisis de la relación entre el coeficientes de ventilación con la concentración de ozono, monóxido de carbono y material particulado menor a 2.5 micrómetros, para la estación del Centro de Ciencias de la Atmósfera, usando series de tiempo y diagramas de tipo espacio-fase, que permitieron analizar la relación entre las variables que componen al coeficiente de ventilación y la concentración de contaminantes. De este análisis se concluye lo siguiente:

- Los episodios donde la concentración de ozono fue más alta ocurren durante la tarde, cuando la altura de la capa límite alcanza su valor máximo y cuando los valores de rapidez del viento están por debajo de los 4 m/s . Sin embargo, es difícil identificar la causa de las altas concentraciones de ozono, pues se pueden deber al forzamiento radiativo, asociado a los máximos de la altura de capa límite, o al estancamiento de las masas de aire, debido a la baja rapidez del viento.
- Se pudo comprobar que en los días donde el VC se superó los 6000 m^2/s y de la rapidez del viento superó los 4 m/s , hubo bajas concentraciones de ozono.
- Para los $PM_{2.5}$ no fue posible identificar zonas donde se agruparan los episodios con concentraciones máximas, no obstante, se pudo comprobar que cuando el coeficiente de ventilación y la rapidez del viento superan los 6000 m^2/s y los 4 m/s , las concentraciones de $PM_{2.5}$ son bajas.
- Para el monóxido de carbono, se observó que su concentración máxima sucede principalmente durante la mañana, cuando la altura de capa límite y la rapidez del viento son bajas. Sin embargo, las concentraciones de monóxido de carbono registradas no representaron una amenaza para la salud de los habitantes del Valle de México.

Con lo anterior, se concluye que el coeficiente de ventilación es un parámetro adecuado para identificar los eventos de alta concentración de contaminantes; sin embargo, en algunos casos no es condición suficiente. Por esta razón, es necesario considerar la contribución de las variables que lo componen. Principalmente, se observó que el viento domina en la ventilación en los tres contaminantes analizados, lo que indica que se requiere establecer una rapidez mínima necesaria del viento, para identificar escenarios con buena ventilación. Esto concuerda con los criterios establecidos en el reporte del Centro Nacional Meteorológico de Estados Unidos [20],

donde se establece que la rapidez del viento mínima tiene que ser de 4 m/s , y el coeficiente de ventilación debe superar los $6000 \text{ m}^2/\text{s}$. Se pudo observar que dichos criterios son válidos para identificar escenarios con buena ventilación en el Valle de México.

Apéndice A

Validación de altura de capa límite planetaria

En esta sección se muestran los resultados de la validación de la altura de capa de mezcla del modelo WRF, realizada para la estación meteorológica del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), en el año 2015. Los resultados del modelo se compararon directamente con observaciones de la altura de capa de mezcla realizadas con un ceilómetro (LIDAR), que se encuentra en el CCA.

A.1. Resultados mensuales

Las validaciones para el año 2015 se realizaron de forma mensual para identificar los meses donde el modelo tiene un mejor desempeño. Sin embargo, para facilitar su análisis, se agruparon los meses de acuerdo a la temporada a la que pertenecen. A continuación se muestran los resultados de la validación, para la temporada seca fría, la temporada seca cálida y la temporada de lluvias.

A.1.1. Temporada seca fría

La temporada seca fría comprende los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero. Debido a que en este estudio sólo se analizó el año 2015, el análisis comienza con los meses de enero y febrero, mostrados en la figura [A.1](#). Después se analizó los meses de noviembre y diciembre, mostrados en la figura [A.2](#). Los paneles izquierdos de la figura [A.1](#), corresponde a la comparación del promedio horario de la altura de capa de mezcla del modelo contra el de las mediciones realizadas con el ceilómetro, de enero y febrero. En esta gráfica es posible apreciar que la altura de capa de mezcla

del modelo siempre está por debajo de la medida por el ceilómetro. En particular, las alturas medidas por el ceilómetro superan por más de 1000 m a los valores estimados por el modelo durante las primeras horas de la noche y las primeras horas de la madrugada, de 19:00 a 3:00 para enero y de las 18:00 horas hasta las 0:00 horas, para febrero.

En ambos meses, durante las horas del día se aprecia que alturas del modelo se acercan más a las observadas con una diferencia media de 600 m , por debajo de la estimada por el ceilómetro. Se aprecia que de 10:00 a 12:00 es cuando el modelo se acerca más a los valores observados. A favor del modelo, la altura de capa de mezcla máxima promedio ocurre alrededor del máximo medido. En enero, la altura máxima promedio del ceilómetro fue de 2490 m y ocurrió a las 16 horas, mientras que la altura máxima promedio del WRF fue de 1777 m y también ocurrió a las 16 horas. En febrero, el promedio máximo del ceilómetro ocurre a las 15 horas y es de 2490, mientras que el promedio máximo del modelo ocurre a las 16 y es de 1919 m .

Por otro lado, en la gráficas de correlación de la altura de la capa límite medida con el ceilómetro y la altura de capa límite del modelo [A.1](#) (paneles derechos), se puede ver de forma más clara cómo las alturas del modelo son subestimadas constantemente. Los datos que corresponden al intervalo de tiempo de 9:00 a 18:00 están más cerca de la línea de correlación ideal (línea punteada), lo que confirma que el WRF estima mejor la altura de capa de mezcla durante el día. En ambas gráficas se puede apreciar la regresión lineal, la cual está por debajo de la línea de ajuste ideal. El coeficiente de correlación asociado a los datos en enero es de 0.628 y en febrero es de 0.78.

Las validaciones de los meses de noviembre y diciembre se muestran en la figura [A.2](#). En las figuras de comparación del ciclo diario promedio (a la izquierda), se aprecia que la altura de capa de mezcla del modelo siempre está por debajo de la altura medida por el ceilómetro. En Diciembre las alturas del ceilómetro superan por más de 1000 m a los valores estimados por el modelo en el intervalo de 13:00 horas a 23:00 horas, mientras que en noviembre esto ocurre sólo entre las 18:00 horas hasta las 21:00 y de las 23:00 horas hasta las 00:00. En ambos meses, durante la madrugada, se aprecia un decaimiento en la altura medida por el ceilómetro desde los 1000 m hasta los 500 m en promedio. Sin embargo en ambos meses la altura estimada por el modelo mantiene valores inferiores a los 500 m , para todas las horas de la madrugada.

Durante el día, es posible ver que el mes de diciembre tiene un máximo promedio del ceilómetro superior al de noviembre. En diciembre el máximo del ciclo diario

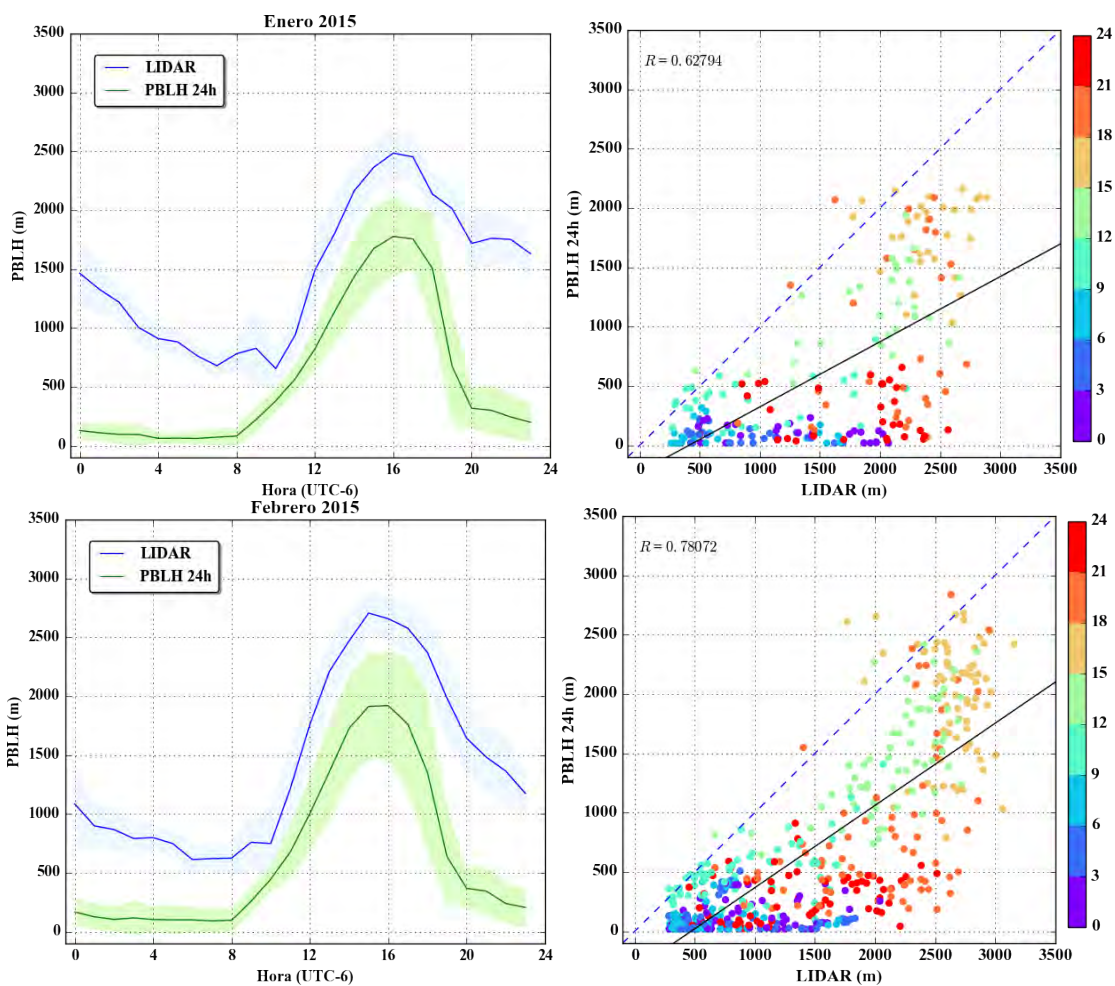


Figura A.1: Validación de altura de capa de mezcla para el mes de enero (paneles superiores) y febrero (paneles inferiores), parte de la temporada seca.

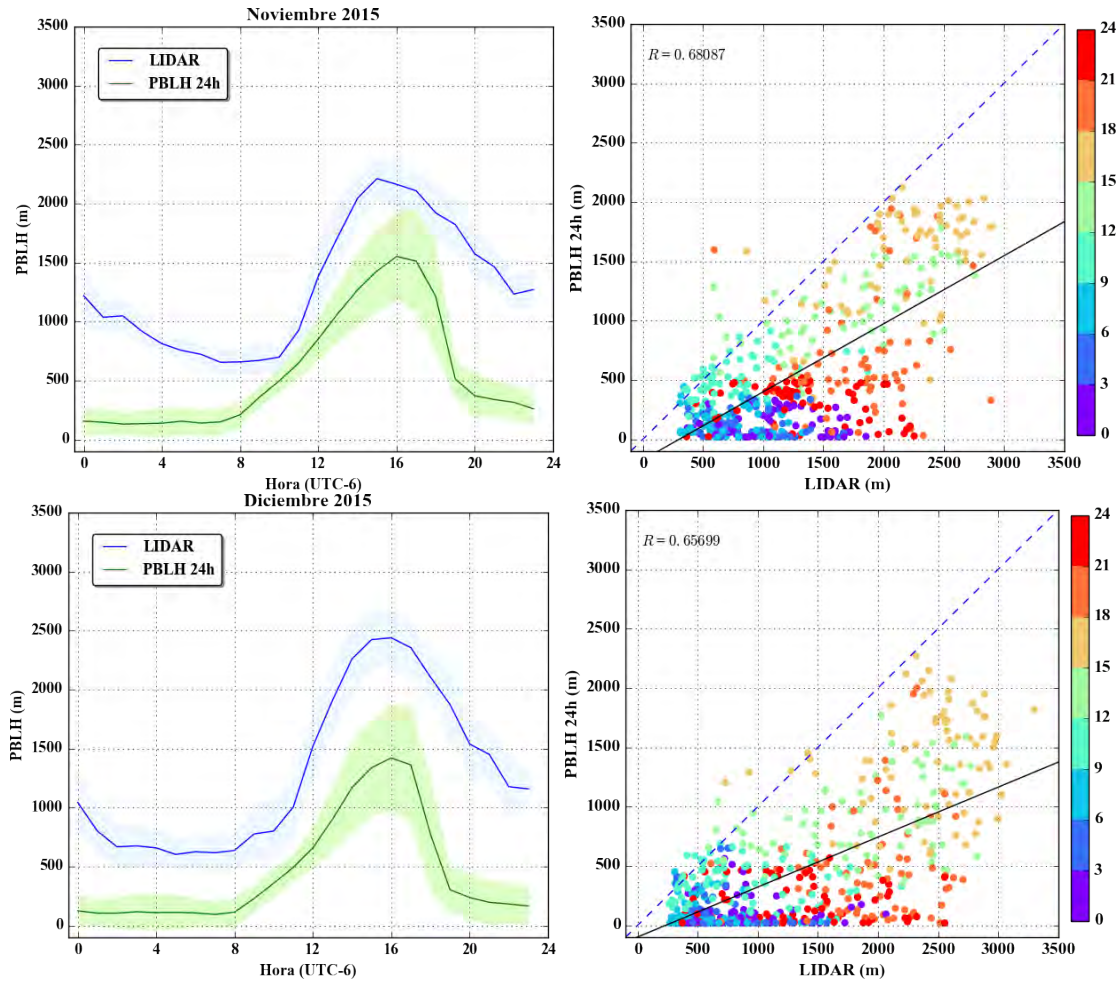


Figura A.2: Validación de altura de capa de mezcla para el mes de noviembre (paneles superiores) y diciembre (paneles inferiores), parte de la temporada seca.

promedio fue de 2444 m y se registró a las 16:00 hora. Mientras que en noviembre fue de 2166 m y también se registró a las 16:00 horas. En cambio, el máximo del modelo para diciembre fue de 1421 m , registrado a las 16:00, y en noviembre fue de 1552 m , para las 16:00 horas. Lo que implica que en diciembre, en promedio, el modelo subestima por 1000 m las alturas medidas por el ceilómetro. Para noviembre sucede lo mismo, sin embargo subestima la altura por poco más del 500 m . En la tabla A.1, se comparan las alturas máximas del modelo con el ceilómetro, y la hora en la que se registran.

En las gráficas de correlación, a la derecha de la figura A.2, se aprecia que en noviembre y diciembre el ajuste lineal está por debajo de la línea de ajuste ideal. El coeficiente de correlación de noviembre fue de 0.680, mientras que para diciembre fue de 0.657. Siguiendo la escala de colores que marca la hora de ocurrencia de las alturas, se puede apreciar que en noviembre, las alturas del modelo concuerdan

mejor con las del ceilómetro en el intervalo de 9:00 a 18:00 horas. Mientras que para diciembre son los intervalos de 9:00 a 12:00 horas y de 15:00 a 18:00.

A.1.2. Temporada seca cálida

La validación para el mes de marzo y el mes de abril, que componen la temporada seca cálida, se muestran en la figura A.3. Los paneles izquierdos muestran las comparaciones entre los ciclos diarios promedio y a la derecha se muestra las gráficas de correlación para cada mes, los paneles superiores corresponde a marzo y los inferiores a abril.

En las figuras de comparación del ciclo diario promedio se puede observar que ambos meses son muy similares. Se aprecia que en ambas gráficas la altura de capa de mezcla estimada por el modelo está por debajo de la medida con el ceilómetro, durante todo el ciclo diario. Para ambos meses, se observa que donde hay mayor diferencia entre el ceilómetro y el modelo es durante las horas de la noche, entre las 19:00 a las 23:00 horas y entre las 00:00 a las 4:00 horas de la madrugada. Estas son las peores horas en las que el modelo estima la altura de capa de mezcla, debido a que la altura medida con el ceilómetro supera por más de 1000 m a la estimada por el modelo. Esto se confirma en las gráficas de dispersión a la derecha de la figura A.3, pues para los puntos que están en dicho intervalo, se ve que tienen una distribución que sigue el eje de las abscisas, es decir, constantemente PBLH oscila entre cero y 500 m de altura.

Durante el día, entre las 8:00 y las 15:00 horas, se observó una mejora en la estimación de la capa de mezcla por parte del modelo, con respecto a ceilómetro, en ambos meses. En estas horas, la diferencia entre ambas series oscila entre los 500 m . Sin embargo, en abril el modelo estima mejor la altura durante el día comparada con marzo, pues se aprecia que en el periodo de 12:00 a 17:00 horas el promedio de las alturas se acerca a menos de 500 m con respecto al ceilómetro. Mientras que para marzo, la diferencia entre el ceilómetro y el modelo, en las mismas horas, supera los 500 m . Para ambos meses se observa que a partir de las 16:00 horas, la altura estimada por el modelo empieza a decrecer más rápidamente que la medida por el ceilómetro. El máximo del ciclo diario promedio para marzo fue de 2599 m , según lo registrado por el ceilómetro, y fue de 1922 m según lo estimado por el modelo. Para abril la altura máxima del ciclo diario registrada por el ceilómetro fue de 2643 m , mientras que la estimada por el modelo fue de 2393 m . En la tabla A.1, se muestran estas alturas máximas obtenidas del ciclo diario de cada mes.

La gráfica de correlación, mostrada en ambos paneles derechos de la figura A.3,

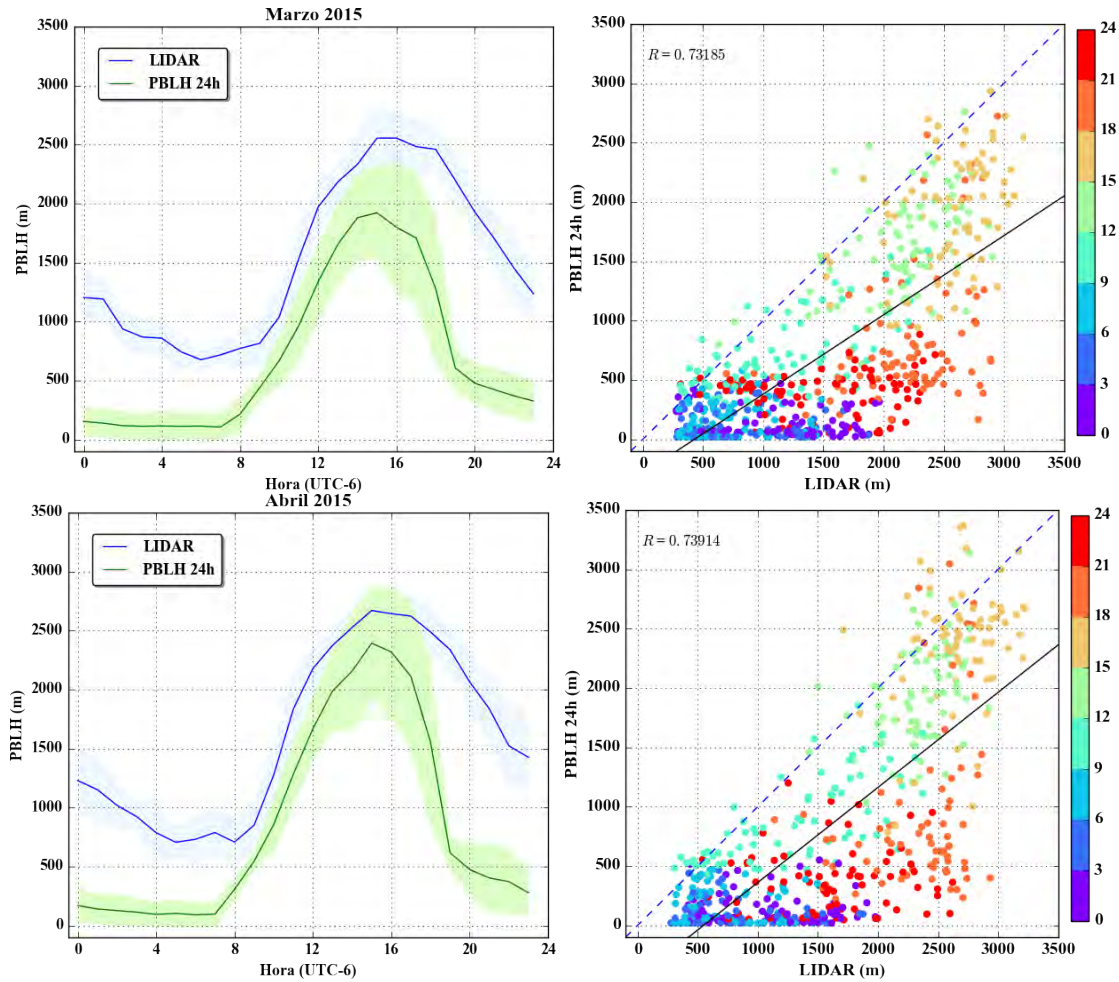


Figura A.3: Validación de altura de capa de mezcla para el mes de marzo (paneles superiores) y abril (paneles inferiores).

se aprecia que las horas en donde el modelo se acerca más a las alturas observadas es durante el día, entre las 9:00 y las 15:00 horas, ya que la distribución de estos puntos sigue la tendencia de la recta de ajuste ideal. El intervalo de 15:00 a 18:00, se puede ver que hay puntos que están cerca de la recta de ajuste ideal, sin embargo, hay algunos puntos que se alejan de la línea de ajuste ideal, donde el modelo subestima considerablemente la altura de capa de mezcla.

A.1.3. Temporada de lluvias

La temporada de lluvias comprende los meses entre mayo y octubre. La temporada se separó en dos figuras donde se muestran las gráficas de la validación para cada mes. En la figura A.4 se muestran los resultados de los meses de mayo, junio y julio, mientras que en la figura A.5 se muestran los resultados de los meses de agosto,

septiembre y octubre.

Para la primera parte del día, entre las 00:00 y 6:00 horas, se puede ver que el modelo subestima la capa límite por más de 500 m , para los meses de mayo, junio y julio. Para los meses de agosto, septiembre y octubre, se puede ver el mismo comportamiento del modelo para las primeras seis horas del día. La capa límite estimada por el modelo empieza a crecer a partir de las siete de la mañana, en todos los meses de la temporada. Entre el periodo de las 8:00 a las 14:00 horas, el modelo estima mejor la altura, pues la diferencia es menor a los 500 m , sin embargo, el modelo está por debajo del promedio de las alturas del ceilómetro.

En el ciclo promedio diario, el modelo alcanza su máximo a las 15:00 horas para la mayoría de los meses, excepto en agosto, donde el máximo se alcanza a las 16:00 horas. En los ciclos diarios promedio del ceilómetro, el máximo se registró a las 16:00 horas en todos los meses, excepto en agosto, donde se registró a las 15:00, y en octubre donde el máximo se alcanzó a las 17:00 horas. En la tabla [A.1](#), se comparan las alturas máximas del modelo con el ceilómetro. De estos meses, destacan mayo y agosto, debido a que estos meses son los que más se acercan al valor máximo del ceilómetro.

La altura de capa de mezcla estimada por el modelo empieza de decrecer a partir de las 16:00, al igual que la altura medida por el ceilómetro. sin embargo la razón de cambio con la que decrece el modelo es mayor a la del ceilómetro, lo que implica que la diferencia entre el modelo y el ceilómetro incrementa conforme se alcanza el final del ciclo diario.

En la gráficas de correlación, a la derecha de la figura [A.4](#) y la figura [A.5](#), se aprecia que las horas entre las 9:00 y las 18:00 son en las que su distribución se encuentra cerca de la distribución ideal. Para todos los meses, excepto octubre, se aprecia que hay datos en los que la altura estimada por el modelo es superior a las medidas por el ceilómetro, la mayoría pertenecientes al intervalo de 15:00 a 18:00 horas. Para las horas de la madrugada y las últimas horas de la noche, se puede observar que para todos los meses el modelo subestima la altura de la capa de mezcla de manera recurrente. Los casos en donde éstos superan a las alturas del ceilómetro son muy pocos, y no son representativos debido a que la superan por una diferencia pequeña. Los ajustes lineales calculados para todos los meses están por debajo de la línea de ajuste ideal. Los índices de correlación de cada gráfica fueron: 0.679 para mayo, 0.666 para junio, 0.719 para julio, 0.718 para agosto, 0.661 para septiembre y 0.720 para octubre.

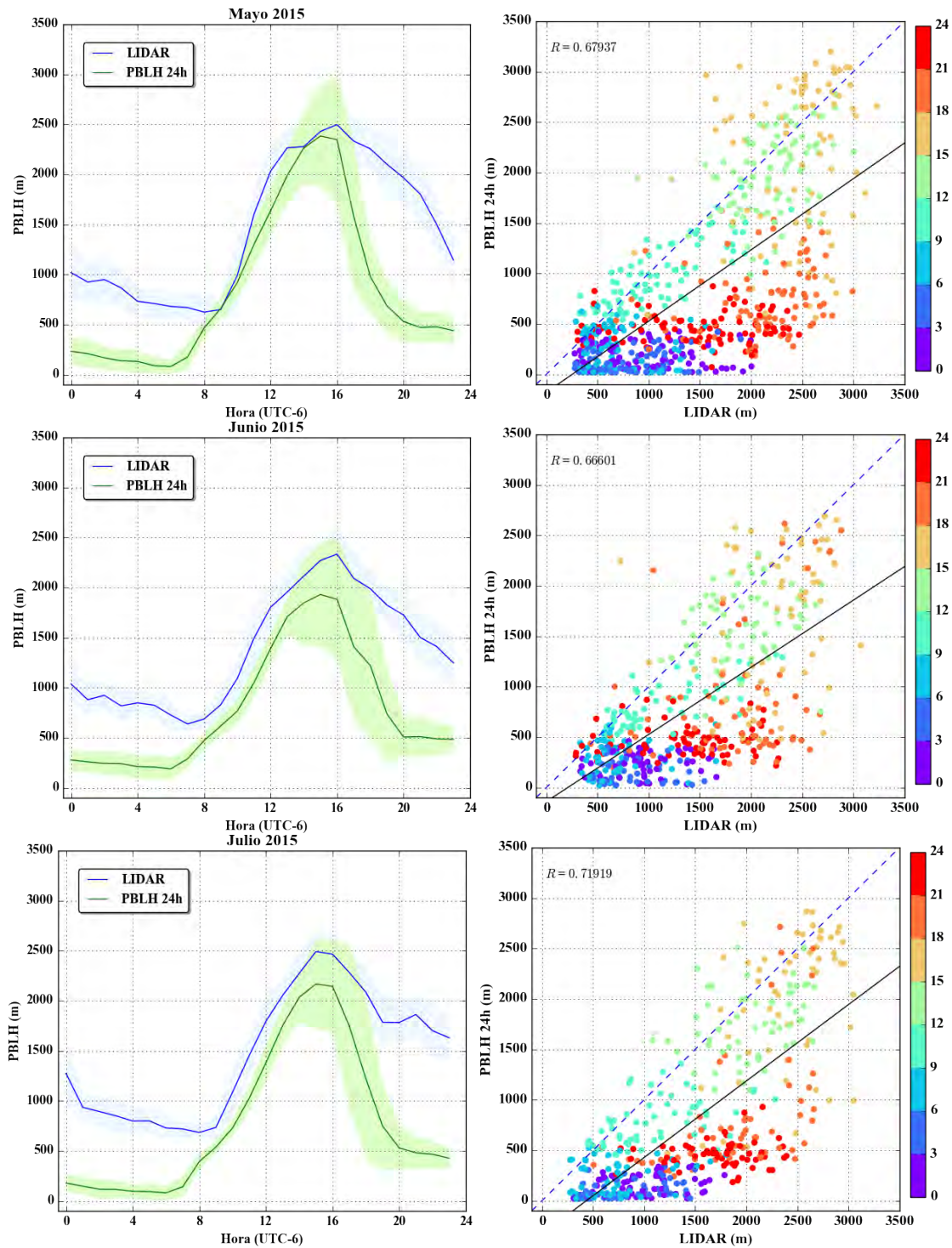


Figura A.4: Validación de altura de capa de mezcla para el mes de mayo (paneles superiores), junio (paneles medios) y julio (paneles inferiores), pertenecientes a la primera parte de la temporada de lluvias.

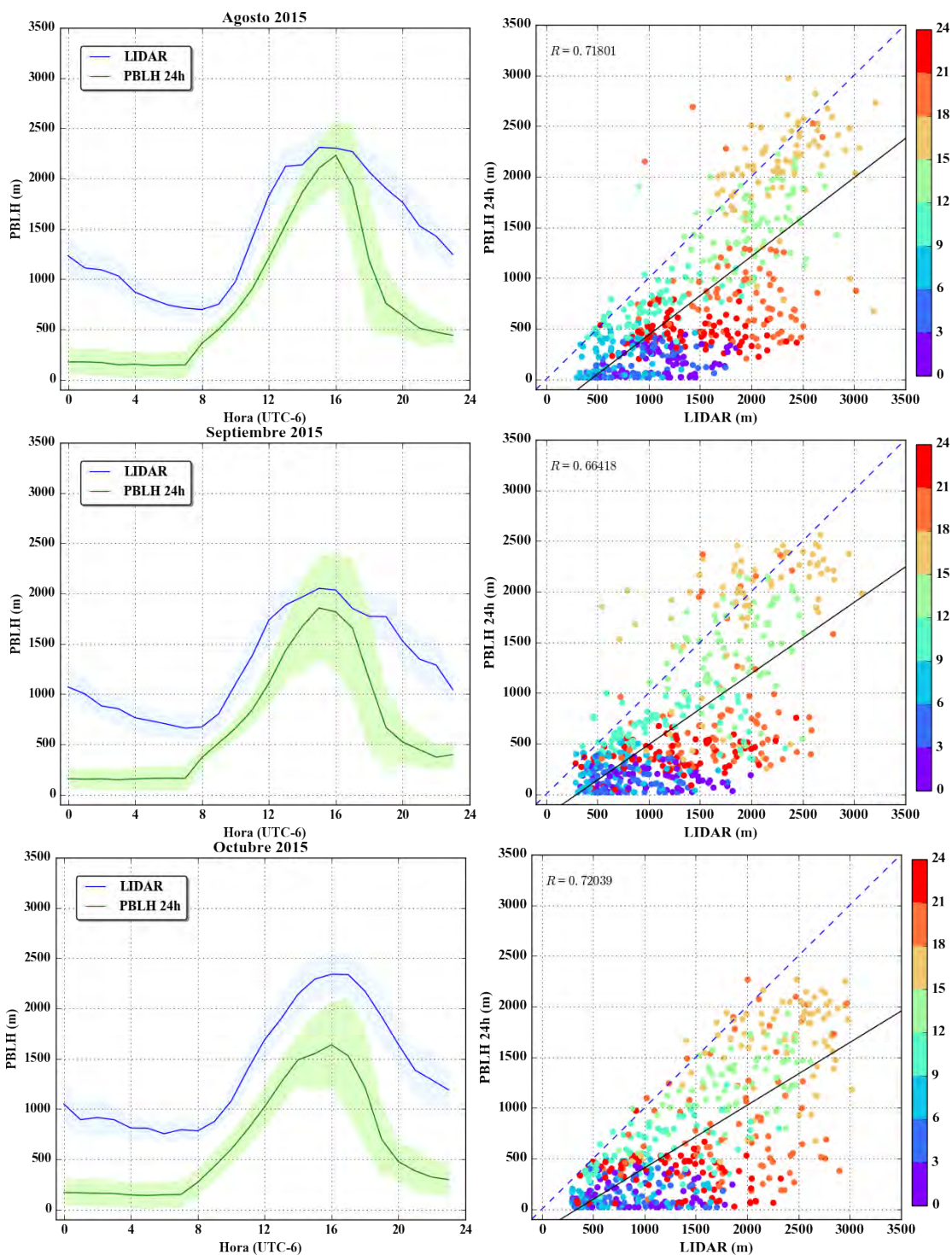


Figura A.5: Validación de altura de capa de mezcla para el mes de agosto (paneles superiores), septiembre (paneles medios) y octubre (paneles inferiores), pertenecientes a la segunda parte de la temporada de lluvias.

A.2. Coeficiente de correlación mensual

Para todos las gráficas de correlación entre altura de capa de mezcla del ceilómetro contra el modelo, mostradas en la sección A.1, se calculó el coeficiente de correlación para poder cuantificar la relación entre lo medido y lo modelado. En la figura A.6, se muestran los coeficientes de correlación de todos los meses. En ésta se puede apreciar que todos los coeficiente de correlación son positivos y están acotados entre 0.6 y 0.8, lo que indica que la correlación es positiva.

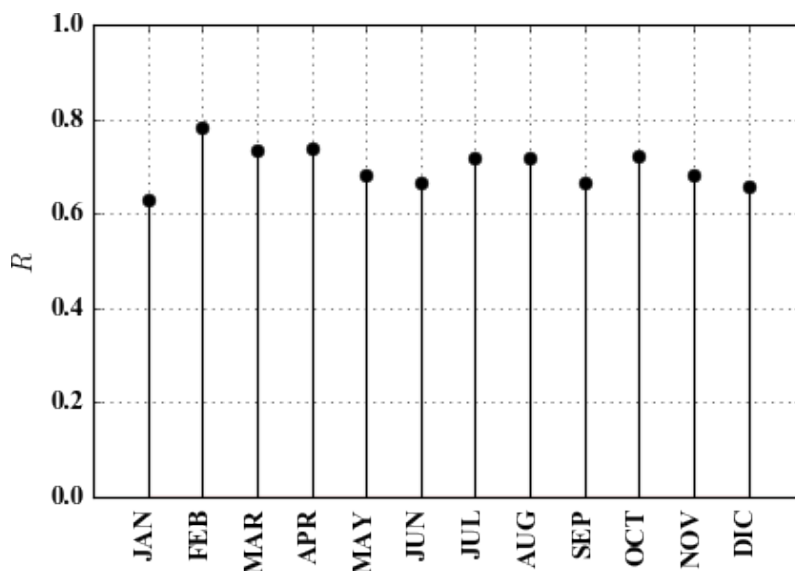


Figura A.6: Gráfica comparativa entre los coeficientes de correlación mensuales de la altura de capa de mezcla medida con el con el ceilómetro contra los del modelo, para el año 2015.

En particular, se puede apreciar que el coeficiente de correlación más bajo de todos los meses es el de enero, con un valor de 0.628. En cambio, el coeficiente de febrero es el máximo de todo el año, con un valor de 0.78. Ambos meses pertenecen a la temporada seca fría, en la que también se encuentran los meses de noviembre y diciembre. En noviembre se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.681 y en diciembre de 0.657. El promedio para la temporada seca fría fue de 0.687. En la temporada seca cálida, se obtuvieron coeficientes de correlación de 0.732 y 0.739, para marzo y abril respectivamente. El promedio para esta temporada fue de 0.736. Para la temporada de lluvias se obtuvieron los siguientes coeficientes de correlación: 0.679 en mayo, 0.666 en junio, 0.719 en julio, 0.718 en agosto, 0.664 en septiembre y 0.72 en octubre. El promedio de esta temporada fue de 0.695.

A.3. Altura máxima promedio mensual

De los ciclos diarios promedio de cada mes, mostrados en la sección A.1, se seleccionó los máximos de todos los meses, tanto del modelo como del ceilómetro, y la hora en la que ocurren. Con esto se identificó el mes con la altura máxima más grande y el mes con la altura máxima más pequeña registrada en el 2015. En la tabla A.1 se muestran los datos recopilados para todos los meses.

Temporada	Mes	PBLH (m)	Hora	LIDAR (m)	Hora
Seca fría	Enero	1777	16:00	2490	16:00
	Febrero	1919	16:00	2773	15:00
Seca caliente	Marzo	1922	15:00	2599	15:00
	Abril	2393	15:00	2643	15:00
Lluvias	Mayo	2384	15:00	2563	16:00
	Junio	1930	15:00	2312	16:00
	Julio	2167	15:00	2513	16:00
	Agosto	2231	16:00	2328	15:00
	Septiembre	1856	15:00	2100	16:00
	Octubre	1638	16:00	2363	17:00
Seca fría	Noviembre	1552	16:00	2166	16:00
	Diciembre	1421	16:00	2444	16:00

Cuadro A.1: Alturas de capa límite máximas de los promedios mensuales del modelo WRF (PBLH) y del ceilómetro (LIDAR). Los meses en color azul pertenecen a la temporada seca fría, el color naranja a la seca caliente y en verde a la temporada de lluvias.

En la tabla A.1 se aprecia que el mes con el máximo mas grande registrado, tanto para el ceilómetro y el modelo, fue abril. El máximo para del modelo fue de 2393 *m* y se registró a las 15:00 horas. Para el ceilómetro, la altura máxima fue de 2643 *m* y ocurrió a las 15:00 horas. La altura máxima del promedio más pequeña registrada con el ceilómetro ocurrió en el mes de septiembre con una altura de 2100 *m*, a las 16:00 horas. Para el modelo, esta ocurrió en diciembre con una altura de 1421 *m*, a las 16:00 horas.

El promedio de las alturas máximas del ciclo promedio diario para la temporada seca fría fue de 2468 *m*, para el ceilómetro, y de 1667 *m*, para el modelo. Lo que indica que estos meses son en los que el modelo peor estima la capa de mezcla. En la temporada seca cálida, el promedio fue de 2621 *m*, para el ceilómetro, y de 2157 *m* para el modelo. lo cual representa una mejora en la estimación de la altura de capa de mezcla, comparada con la temporada seca fría. Finalmente, en la temporada de lluvias, el promedio para el ceilómetro fue de 2363 *m* y para el modelo fue de

APÉNDICE A. VALIDACIÓN DE ALTURA DE CAPA LÍMITE PLANETARIA

2034 *m*, lo que indica que durante estos meses el modelo estimó el máximo con mayor exactitud.

Bibliografía

- [1] *Las Zonas metropolitanas en México*. Inf. téc. INEGI, 2014.
- [2] Ernesto Jauregui. «Local wind and air pollution interaction in the Mexico basin». En: *Atmósfera* 1.3 (1988).
- [3] Chan Lu y col. «Characteristics of ventilation coefficient and its impact on urban air pollution». En: *Journal of Central South University* 19.3 (2012), págs. 615-622.
- [4] Roland B Stull. *An introduction to boundary layer meteorology*. Vol. 13. Springer Science & Business Media, 2012.
- [5] Praveena Krishnan y PK Kunhikrishnan. «Temporal variations of ventilation coefficient at a tropical Indian station using UHF wind profiler». En: *Curr. Sci* 86.3 (2004), págs. 447-451.
- [6] Petra Seibert y col. «Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height». En: *Atmospheric environment* 34.7 (2000), págs. 1001-1027.
- [7] Fabien Gibert y col. «Internal gravity waves convectively forced in the atmospheric residual layer during the morning transition». En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137.659 (2011), págs. 1610-1624.
- [8] B De Foy y col. «Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign». En: *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 5.3 (2005), págs. 2503-2558.
- [9] James E Bossert. «An investigation of flow regimes affecting the Mexico City region». En: *Journal of Applied Meteorology* 36.2 (1997), págs. 119-140.
- [10] B de Foy y col. «Rapid ventilation of the Mexico City basin and regional fate of the urban plume». En: *Atmospheric Chemistry and Physics* 6.8 (2006), págs. 2321-2335.

- [11] Susana Carreón-Sierra y col. «Cluster analysis of the wind events and seasonal wind circulation patterns in the Mexico City region». En: *Atmosphere* 6.8 (2015), págs. 1006-1031.
- [12] World Health Organization y col. «WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulphur dioxide. Global Update 2005. Summary of risk assessment». En: *Google Scholar* (2005).
- [13] Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. *Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2015*. Inf. téc. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico, jul. de 2016.
- [14] *Gráficos estadísticos*. URL: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aqBhnm0kZA==%27> (visitado 14-05-2018).
- [15] MUNN RE. *Biometeorological methods*. 1970.
- [16] Georgios A Athanassiadis y col. «Boundary layer evolution and its influence on ground-level ozone concentrations». En: *Environmental Fluid Mechanics* 2.4 (2002), págs. 339-357.
- [17] US Iyer y P Ernest Raj. «Ventilation coefficient trends in the recent decades over four major Indian metropolitan cities». En: *Journal of earth system science* 122.2 (2013), págs. 537-549.
- [18] Stephen Berman, Jia-Yeong Ku y S Trivikrama Rao. «Spatial and temporal variation in the mixing depth over the northeastern United States during the summer of 1995». En: *Journal of Applied Meteorology* 38.12 (1999), págs. 1661-1673.
- [19] Agustin Garcia-Reynoso y col. «Ozone weekend effect analysis in México City». En: *Atmósfera* 22.3 (2009), págs. 281-297.
- [20] Edward Gross. *The national air pollution potential forecast program*. Inf. téc. NATIONAL METEOROLOGICAL CENTER WASHINGTON DC, 1970.
- [21] *Weather Research and Forecasting Model*. URL: <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model> (visitado 23-04-2018).
- [22] Song-You Hong, Yign Noh y Jimy Dudhia. «A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes». En: *Monthly weather review* 134.9 (2006), págs. 2318-2341.

- [23] Akio Arakawa y Vivian R Lamb. «Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model». En: *Methods in computational physics* 17 (1977), págs. 173-265.
- [24] JL García-Franco y col. «Variability of the Mixed-Layer Height Over Mexico City». En: *Boundary-Layer Meteorology* (2018), págs. 1-15.
- [25] *El monitoreo de la calidad del aire*. URL: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=%27> (visitado 20-05-2018).
- [26] Linsey C Marr y Robert A Harley. «Modeling the Effect of Weekday- Weekend Differences in Motor Vehicle Emissions on Photochemical Air Pollution in Central California». En: *Environmental science & technology* 36.19 (2002), págs. 4099-4106.