



UNIVERSIDAD  
DE LA REPUBLICA  
URUGUAY

# Calidad del aire en la región centro-oeste de Uruguay

Caracterización y relación con la meteorología local y regional.

Natalia Gil

Programa de Posgrado de PEDECIBA Geociencias  
Facultad de Ciencias  
Universidad de la República  
Montevideo – Uruguay  
Enero de 2024



UNIVERSIDAD  
DE LA REPUBLICA  
URUGUAY

# Calidad del aire en la región centro-oeste de Uruguay

Caracterización y relación con la meteorología local y regional.

Natalia Gil

Tesis de Maestría presentada al Programa de Posgrado de PEDECIBA Geociencias, Facultad de Ciencias de la Universidad de la República, como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Magíster en PEDECIBA Geociencias.

Director:

PhD Prof. Marcelo Barreiro

Montevideo – Uruguay

Enero de 2024

Gil, Natalia

Calidad del aire en la región centro-oeste de Uruguay  
/ Natalia Gil. - Montevideo: Universidad de la República,  
Facultad de Ciencias, 2024.

xvii, 101 p.: il.; 29, 7cm.

Director:

Marcelo Barreiro

Tesis de Maestría – Universidad de la República,  
Programa de PEDECIBA Geociencias, 2024.

Referencias bibliográficas: p. 93 – 101.

1. Contaminación atmosférica, 2. Transporte de  
contaminantes, 3. Patrones de circulación regional.  
I. Barreiro, Marcelo, . II. Universidad de la República,  
Programa de Posgrado de PEDECIBA Geociencias.  
III. Título.

## INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

---

---

Ph.D. Prof. Medeleine Renom

---

---

Ph.D. Prof. Erna Frins

---

---

Ph.D. Prof. Ramiro Saurral

Montevideo – Uruguay

Enero de 2024

# Agradecimientos

Quisiera agradecer a la empresa UPM que cedió los datos generados en su estación de calidad de aire para analizar en este trabajo.

## RESUMEN

En esta tesis se estudia la calidad del aire en la región centro-oeste de Uruguay y su relación con las condiciones meteorológicas locales y regionales. En la primera etapa de análisis, se caracteriza el comportamiento de los contaminantes  $MP_{10}$ ,  $NO_x$  y  $CO$  a partir de series de datos horarios que abarcan el período entre enero de 2008 hasta diciembre del 2018, recabadas en la ciudad de Fray Bentos (departamento de Río Negro). Para ello se realiza un análisis exploratorio del comportamiento climatológico de los tres parámetros indicadores de la calidad del aire y se estudia la variabilidad interanual e interestacional de los contaminantes y su ciclo diario y mensual. También se analiza la relación entre el ciclo diario medio mensual de concentración y altura de la capa límite en la región de estudio. Para finalizar esta etapa, se relacionan los valores de concentración con los valores de dirección y velocidad de viento tomados in situ y, con el módulo Openair del software R, se construyen polarplot por trimestre, para cada contaminante.

La segunda etapa de análisis se enfoca en el trimestre de invierno (JJA), cuando los valores de contaminantes alcanzan los máximos anuales, según la climatología construida en la primera etapa. Los análisis realizados se dividen en dos partes. En la primera, se identifican dos tipos de eventos de contaminación en el sitio de estudio: uno originado por fuentes locales de emisión y el segundo asociado al transporte de contaminantes provenientes desde la región central y sur de Brasil, centro-sur de Paraguay y noreste de Argentina. A partir de las cartas sinópticas en superficie y en 850 hPa construidas para los días previos y durante el desarrollo de los eventos se caracterizó la situación sinóptica que enmarcó cada evento de contaminación. Además, usando el modelo HYSPLIT se identificó la trayectoria de las parcelas que arribaron al sitio de observación durante el desarrollo del segundo evento de contaminación. En la segunda parte, se generaliza el estudio de los eventos considerados: se analiza la relación entre patrones de circulación sinóptica característicos de la región y el desarrollo de eventos de contaminación generados por fuentes locales de emisión y por transporte regional de contaminantes.

Los resultados obtenidos en el análisis exploratorio mostraron que hay una estacionalidad bien marcada en el comportamiento de los contaminantes atmosféricos: los valores máximos ocurren en el trimestre JJA y los mínimos en primavera (SON). Además, los gases muestran un ciclo diario con dos máximos: uno ocurre en horas de la mañana y el otro (y más importante) ocurre en la noche; el mínimo diario ocurre pasado el medio día. En cambio, el ciclo diario de las partículas presenta un solo máximo diario que

ocurre en la noche. Para los tres contaminantes se observó que el ciclo diario se acentúa en los meses fríos. A partir de los polarplots se deduce que la fuente de emisión de  $NO_X$  en el sitio de estudio es principalmente local a lo largo del año. En el caso del  $CO$  y  $MP_{10}$  se observa la influencia de una fuente local pero también hay una señal de transporte de contaminantes provenientes del sector norte en invierno. En cuanto a los eventos estudiados, se observa que son más significativos desde el punto de vista de valores detectados, los asociados a fuentes locales de emisión pero son de duración menor que los eventos asociados al transporte regional de contaminantes. Además, frente a un evento de contaminación por fuente local, las series de los tres contaminantes estudiados se ven afectadas, mientras que el transporte de contaminantes afecta principalmente al  $CO$  y al  $MP_{10}$ . Por último, los eventos de contaminación por fuente local, ocurren preferentemente bajo la influencia de un patrón de circulación sinóptica en la región, caracterizado por la presencia de un sistema ciclónico posicionado sobre el océano Atlántico, al sureste de Uruguay por lo que la zona de estudio se ve afectada por viento proveniente del sector suroeste.

Palabras claves:

Contaminación atmosférica, Transporte de contaminantes, Patrones de circulación regional.

# Lista de figuras

3.1	Climatología de los vientos en nivel 1000 hPa y precipitación ( $mm.da^{-1}$ ), por trimestre: DEF, MAM, JJA, SON. Fuente: Arizmendi et al. (2022) . . .	18
3.2	Rosas horarias de viento en distintas regiones de Uruguay (tomadas de Barreiro et al. 2021). . . . .	19
3.3	Distribución espacial del espesor óptico de aerosoles (AOD) sobre Uruguay, por mes, durante el año 2015. Fuente: MODIS TERRA & ACQUA	21
3.4	Distribución espacial del espesor óptico de aerosoles (AOD) sobre Uruguay, por mes, durante el año 2017. Fuente: MODIS TERRA & ACQUA	22
3.5	Emisión anual de contaminantes por departamento (ton/año). Imágenes tomadas del Inventario de emisiones atmosféricas 2015 (Cataldo et al. 2019). . . . .	24
4.1	Imágen satelital de la zona de estudio y ubicación geográfica de la estación de monitoreo de calidad de aire: estación Ubici. Fuente: Google Earth. . . . .	28
4.2	Rosas de vientos construidas con promedios horarios de dirección y velocidad registradas en la zona de estudio. Periodo de estudio: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018. . . . .	31
4.3	Marcha diaria de altura de la CLA en la región centro oeste del país, por trimestre y anual, construida a partir de datos horarios de reanálisis ERA-5. Período: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018. . . . .	32
4.4	Patrones de circulación (PC) típicos identificados para América del Sur tomados de Arizmendi et al. 2022, para el trimestre JJA. Estos PC's se construyeron a partir del análisis de clusters, por el método de K-means, sobre el campo de presión de nivel del mar del reanálisis NCEP CDAS1.	34
4.5	Boxplots de frecuencia de ocurrencias para cada PC (indicados como WR, por sus siglas en inglés), durante el trimestre JJA, discriminado según fases de ENSO. Figura tomada de Arizmendi et al. (2022). . . .	35

4.6	Rosas de viento construidas con registros de dirección y velocidad medidos en la estación meteorológica local, discriminados por PC típicos identificados para América del sur (Arizmendi et al. 2022), para el trimestre JJA. . . . .	36
5.1	Serie temporal de valores horarios de $CO$ en estación Ubici, para el periodo entre el 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018, expresados en $\mu g.m^{-3}$ . . . . .	43
5.2	Boxplot de valores horarios de concentración de $CO$ observados en estación Ubici, agrupados por trimestres: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM), Junio-Julio-Agosto (JJA), Setiembre-October-Noviembre (SON), expresados en $\mu g.m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Período evaluado: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018. . . . .	43
5.3	Boxplot de valores horarios de concentración de $CO$ observados en estación Ubici, agrupados por mes, expresados en $\mu g.m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Período evaluado: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018. . . . .	45
5.4	Evolución mensual y marcha diaria de valores horarios de concentración de $CO$ observados en la estación Ubici, expresados en $\mu g.m^{-3}$ . Periodo de estudio: 1 de enero del 2008 al 31 de diciembre del 2018. . . . .	46
5.5	Marcha diaria de concentración de $CO$ de la estación Ubici, discriminados por día de la semana y expresados en $\mu g.m^{-3}$ . Periodo de estudio: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018. . . . .	48
5.6	Boxplot de valores horarios de concentración de $CO$ observados en estación Ubici, agrupados por días de la semana, expresados en $\mu g.m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Período evaluado: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018. . . . .	48
5.7	Serie temporal de $NO_x$ en estación Ubici: valores horarios desde el 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018, expresados en $\mu g.m^{-3}$ . . . . .	50

5.8	Valores horarios de $NO_x$ agrupados por estaciones: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM), Junio-Julio-Agosto (JJA), Setiembre-October-Noviembre (SON), expresados en $\mu g.m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Período de estudio: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018. . . . .	50
5.9	Boxplot de valores horarios de concentración de $NO_x$ observados en estación Ubici, agrupados por meses, expresados en $\mu g.m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Período evaluado: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018. . . . .	51
5.10	Evolución mensual y marcha diaria de valores horarios de $NO_x$ en la estación Ubici, expresados en $\mu g.m^{-3}$ . Período de estudio: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018. . . . .	52
5.11	Marcha diaria de $NO_x$ en estación Ubici, discriminados por día de la semana, expresados en $\mu g.m^{-3}$ . Período de estudio: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018. . . . .	53
5.12	Boxplot de valores horarios de $NO_x$ en estación Ubici, agrupados por día de la semana, expresados en $\mu g.m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Período de estudio: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018. . . . .	54
5.13	Serie temporal de $MP_{10}$ en estación Ubici: valores horarios desde el 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018, expresados en $\mu g.m^{-3}$ . . . . .	55
5.14	Boxplot de valores horarios de $MP_{10}$ , en estación Ubici, agrupados por estaciones: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM), Junio-Julio-Agosto (JJA), Setiembre-October-Noviembre (SON), expresados en $\mu g.m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Período evaluado: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018. . . . .	56

5.15 Evolución mensual y marcha diaria de valores horarios de $MP_{10}$ en la estación Ubici, para el periodo entre 1 de enero del 2008 al 31 de diciembre del 2018, expresados en $\mu g.m^{-3}$ . . . . .	57
5.16 Boxplot de valores horarios de $MP_{10}$ de estación Ubici, agrupados por mes, expresados en $\mu g.m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Período: 1 de enero del 2008 al 31 de diciembre del 2018. . . . .	58
5.17 Marcha diaria de $MP_{10}$ en estación Ubici, discriminados por día de la semana, expresados en $\mu g.m^{-3}$ , para el periodo entre el 1 de enero del 2008 al 31 de diciembre del 2018 . . . . .	59
5.18 Boxplot de valores horarios de $MP_{10}$ en estación Ubici, agrupados por día de la semana, expresados en $\mu g.m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Período evaluado: 1 de enero del 2008 al 31 de diciembre del 2018 . . . . .	60
5.19 Polarplots de $CO$ (columna izquierda), $MP_{10}$ (columna central) y $NO_x$ (columna derecha), discriminados por trimestre (DEF, MAM, JJA, SON, desde el panel superior al inferior) en estación Ubici. Período de estudio: entre 1 de enero del 2008 al 31 de diciembre del 2018, expresados en $\mu g.m^{-3}$ . . . . .	61
6.1 Serie de datos horarios de concentración de contaminantes (en orden superior a inferior): $CO$ (línea roja), $MP_{10}$ (línea azul), $NO_x$ (línea negra) y vector viento (panel inferior), entre el 22 y el 26 de julio del 2014. La línea verde en cada panel representa la marcha diaria media de cada contaminante en el mes de julio. . . . .	66
6.2 Cartas sinópticas de superficie (izq.) y nivel 850 hPa (der.) de las 00UTC, para el periodo entre el 22 y el 26 de julio del 2014. Región de análisis: América del Sur. . . . .	68
6.3 Patrones de circulación (PC) identificados para los días previos y posteriores al evento evento estudiado el día 24 de julio del 2014. Los PC fueron tomados de Arizmendi et al. (2022) . . . . .	69

6.4	Serie de datos horarios de concentración de contaminantes (en orden superior a inferior): $CO$ (línea roja), $MP_{10}$ (línea azul), $NO_x$ (línea negra) y vector viento (panel inferior), entre el 25 de julio y el 1 de agosto del 2017. La línea verde en cada panel representa la marcha diaria media de cada contaminante en el mes de julio. . . . .	71
6.5	Cartas sinópticas de superficie y nivel 850 hPa de las 00UTC, para el periodo entre el 27 y el 31 de julio del 2017. Región de análisis: América del sur. . . . .	72
6.6	Trayectorias calculadas por el modelo HYSPLIT, para las parcelas que arriban al sitio de observación los días 27 al 31 de julio a las 00 UTC, representadas por líneas de colores que representan corridas con seis horas de diferencia entre ellas: la línea roja alcanza el sitio de observación a las 00 UTC, la línea azul seis horas antes y la verde doce horas previas a la línea roja. Los puntos amarillos representan los focos de incendio activos durante las 72 horas previas a arribo de las parcelas. . . . .	73
6.7	Trayectorias calculadas por el modelo HYSPLIT, para las parcelas que arriban al sitio de observación los días 29 y 30 de julio a las 00 UTC, representadas por líneas de colores que representan corridas con seis horas de diferencia entre ellas: la línea roja alcanza el sitio de observación a las 00 UTC, la línea azul seis horas antes y la verde doce horas previas a la línea roja. . . . .	74
6.8	Patrones de circulación (PC) identificados para los días previos y posteriores al evento desarrollado entre el 27 y el 30 de julio del 2017. Los PC fueron tomados de Arizmendi et al. (2022) . . . . .	75
6.9	Boxplot de la serie de percentil 95 diario de concentración de $CO$ (panel superior), $MP_{10}$ (panel medio), $NO_x$ (panel inferior), agrupados por PC, para el trimestre JJA, expresados en $\mu g.m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Periodo de estudio: 1 de enero de 2008 al 31 de diciembre de 2018. . . . .	77
6.10	Porcentaje de ocurrencias de patrones de circulación, considerando los valores mas elevados de concentración para los tres contaminantes. Período de estudio: 1 de enero del 2008 al 31 de diciembre del 2018. . . . .	78

6.11 Scatterplot de la serie de valores mas altos de concentración (P90 de la serie de valores de P95 de valores diarios de concentración), agrupados por PC, para los tres contaminantes: $CO$ (panel superior), $MP_{10}$ (panel medio), $NO_x$ (panel inferior), expresados en $\mu g.m^{-3}$ . Periodo de estudio: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018. Estos resultados corresponden al trimestre JJA. . . . .	80
6.12 Concentraciones detectadas los días de evento que coinciden los tres contaminantes. agrupados por PC, para los tres contaminantes: $CO$ (panel superior), $MP_{10}$ (panel medio), $NO_x$ (panel inferior), expresados en $\mu g.m^{-3}$ . Periodo de estudio: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018. Estos resultados corresponden al trimestre JJA. . . . .	81
6.13 Polarplot con valores horarios de $CO$ (panel superior) y $MP_{10}$ (panel inferior), expresados en $\mu g.m^{-3}$ , para los días de eventos de transporte regional coincidentes. . . . .	84

# Lista de tablas

3.1	Focos de incendios registrados por mes, durante el año 2015 y 2017, para el territorio de Uruguay. Fuente: <a href="https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal">https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal</a> . . . . .	20
3.2	Distribución porcentual de emisión anual calculadas por sector, para Uruguay. Fuente: Inventario de emisiones atmosféricas 2015 (Cataldo et al. 2019). . . . .	23
3.3	Valores de calidad objetivo de concentración establecidos en el Decreto 135/021, vigentes hasta el 31/12/2023 y a partir del 01/01/2024 (Ambiente, 2021). . . . .	25
4.1	Especificaciones técnicas de los equipos muestreadores de $CO$ , $NO_x$ , $MP_{10}$ de la estación Ubici: Limite de detección (LD), Ruido de la señal eléctrica y Rango de medición. . . . .	29
5.1	$p\_valor$ obtenido de aplicar el test Mann-Whitney-Wilcoxon con los datos horarios de concentración de $CO$ , agrupados en los trimestres DEF, MAM, JJA, SON, para la estación Ubici. Período analizado: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018. . . . .	44
5.2	$p\_valor$ obtenido de aplicar el test Mann-Whitney-Wilcoxon para los datos horarios de concentración de $CO$ agrupados por días de la semana, para la estación Ubici. Período de estudio:1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018. . . . .	47
5.3	$p\_valor$ obtenido de aplicar el test Mann-Whitney-Wilcoxon para los datos horarios de concentración de $NO_x$ agrupados por días de la semana, para la estación Ubici. Período de estudio:1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018. . . . .	54
5.4	$p\_valor$ obtenido de aplicar el test Mann-Whitney-Wilcoxon entre los valores horarios de $MP_{10}$ agrupados por días de la semana, para la estación Ubici en el período entre 1 de enero al 2008 al 31 de diciembre del 2018. . . . .	59

6.1	Porcentaje de ocurrencias de Patrones de Circulación (PC) durante los eventos de contaminación por fuente local y P50 de concentración por PC expresados en $\mu g.m^{-3}$ , por contaminante. Período evaluado: trimestre JJA desde el 2008 al 2018. . . . .	79
6.2	Porcentaje de ocurrencias de Patrones de Circulación (PC) durante los eventos de contaminación que coinciden en los tres contaminantes y valores medios de concentración por PC expresados en $\mu g.m^{-3}$ , por contaminante. Período evaluado: trimestre JJA desde el 2008 al 2018. . . . .	81
6.3	Total de eventos detectados durante el período evaluado y discriminado por mes, para el trimestre JJA y P50 de los días de duración de los eventos. Período evaluado: 2008 al 2018. . . . .	82
6.4	Porcentaje de ocurrencias de PC los últimos cuatro días de los eventos detectados, por parámetro. Período evaluado: 2008 al 2018. . . . .	83

# Tabla de contenidos

<b>Agradecimientos</b>	<b>v</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>xiv</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Marco teórico</b>	<b>6</b>
2.1 Contaminantes atmosféricos . . . . .	7
2.1.1 Oxidos de nitrógeno: NO <sub>x</sub> . . . . .	8
2.1.2 Material particulado con diámetro aerodinámico menor a 10 $\mu m$ : MP <sub>10</sub> . . . . .	9
2.1.3 Monóxido de Carbono: CO . . . . .	10
2.2 Relación entre las variables meteorológicas y la calidad del aire . . . . .	11
2.3 Antecedentes en América del sur . . . . .	13
<b>3 Presentación del problema y objetivos</b>	<b>17</b>
3.1 Descripción del problema . . . . .	17
3.1.1 Objetivos de la tesis . . . . .	25
<b>4 Datos y métodos</b>	<b>27</b>
4.1 Datos . . . . .	27
4.1.1 Datos de calidad de aire . . . . .	27
4.1.2 Observaciones meteorológicas . . . . .	30
4.1.3 Datos de reanálisis . . . . .	30
4.1.4 Patrones de circulación sinópticos . . . . .	32
4.1.5 Modelo numérico atmosférico: HYSPLIT . . . . .	35
4.1.6 Focos de incendios activos . . . . .	37
4.1.7 Cartas sinópticas . . . . .	37
4.2 Métodos aplicados . . . . .	37

4.2.1	Caracterización de la calidad del aire . . . . .	38
4.2.2	Relación entre patrones de circulación atmosféricos y calidad de aire . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Análisis exploratorio de los contaminantes</b>	<b>42</b>
5.1	Caracterización del parámetro CO . . . . .	42
5.2	Caracterización de $NO_x$ . . . . .	49
5.3	Caracterización de $MP_{10}$ . . . . .	54
5.4	Contaminantes y circulación atmosférica local y regional . . . . .	60
<b>6</b>	<b>Relación entre patrones de circulación sinópticos y contaminantes</b>	<b>64</b>
6.1	Análisis de eventos de contaminación en la región centro-oeste de Uru- guay, durante el invierno . . . . .	65
6.1.1	Análisis de evento de contaminación debido a fuentes locales de emisión . . . . .	65
6.1.2	Análisis de evento de contaminación debido al transporte regional	70
6.2	Relación entre contaminantes y patrones de circulación sinópticos . . .	75
6.2.1	Estudios de eventos de contaminación por fuente local . . . . .	76
6.2.2	Estudio de eventos de contaminación por transporte regional . .	82
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>86</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>93</b>

# Capítulo 1

## Introducción

La contaminación del aire en las ciudades es un factor que influye directamente en la calidad de vida de la población. Las estadísticas publicadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en el año 2016, indican que 4,2 millones de personas mueren al año prematuramente en el mundo, por enfermedades derivadas de la exposición a los contaminantes atmosféricos (World Health Organization, [2018a](#)). Esta cifra se distribuye desproporcionadamente, ya que son los países de ingresos medios y bajos los que soportan la mayor carga de contaminantes ambientales. La OMS también indicó que el 93 % de los niños y adolescentes del mundo están expuestos a niveles de contaminantes que exceden los valores de calidad objetivo. Además, la exposición a la contaminación atmosférica en ambiente exterior y en ambiente doméstico es la causa de casi una de cada diez muertes en niños menores a cinco años (World Health Organization, [2018b](#)).

La exposición a los contaminantes a corto y largo plazo provoca diversos efectos en la salud de las personas. La OMS advierte que la exposición a material particulado produce efectos adversos, principalmente sobre el sistema respiratorio y cardiovascular (World Health Organization, [2006](#)), sobre todo si las partículas tienen un diámetro aerodinámico menor a  $10\ \mu\text{m}$  ( $MP_{10}$ ), ya que son las que tienen mayor capacidad de penetrar en el sistema respiratorio. También, la Sociedad Americana de Cáncer publicó que la exposición a largo plazo a partículas finas tienen efectos significativos en la expectativa de vida (Pope III et al. [2004](#)). Estudios realizados en ciudades como Santiago (Chile), Temuco (Chile), Sydney (Australia), Jakarta (India), entre otras, también han reportado una asociación muy cercana entre el aumento de las concentraciones de material particulado en la atmósfera y el aumento de la mortalidad por enfermedades respiratorias y enfermedades cardiovasculares, además del aumento en consultas médicas por neumonías infantiles (Oyarzúng, [2010](#); Spickett et al. [2011](#); Ayala et al. [2012](#)).

La OMS también hace referencia a otros contaminantes atmosféricos. Se advierte sobre la exposición a altas concentraciones de  $NO_2$  por ser un gas tóxico e irritante. Los efectos sobre la salud están asociados al aumento del riesgo de infecciones en el tracto respiratorio debido a la interacción entre el contaminante y el sistema inmune (T. Chen et al. 2007). Además, también se reportó un aumento en la mortalidad por enfermedades respiratorias y cardiovasculares en presencia de un aumento de la concentración media anual de este contaminante (R. Chen et al. 2012; Faustini et al. 2014) en el aire ambiente.

Es también conocido que la exposición a altas concentraciones de  $CO$  puede provocar efectos adversos en la salud humana debido a su alta toxicidad: la exposición crónica puede provocar daño cerebral y por lo tanto disminución de las capacidades intelectuales, falta de memoria y cambios en la estabilidad emocional. En los casos más severos puede provocar la muerte por asfixia (World Health Organization, 2000; Raub et al. 2000; Townsend y Maynard, 2002).

Es importante resaltar que los contaminantes pueden ser transportados por la atmósfera a miles de kilómetros de distancia desde su fuente de origen, por lo que sus efectos pueden verse a nivel local y regional (Haywood y Boucher, 2000). Esto implica, además, que una región que no emite contaminantes puede ser afectada por contaminantes originados en otra región, e inclusive, originados en otro país.

Por otro lado, se ha estudiado el efecto de los contaminantes atmosféricos a nivel climático y se encontró que el aumento de las concentraciones de aerosoles puede afectar el balance radiativo a través de efectos directos (alterando la capacidad de la atmósfera de absorber o dispersar radiación) o indirectos (alterando las propiedades ópticas de las nubes) (Haywood y Boucher, 2000; Unger, 2012).

El origen de estos contaminantes puede ser muy variado. Las partículas son generadas a partir de procesos naturales, como erupciones volcánicas, emisiones oceánicas, incendios originados naturalmente (Kaufman et al. 2002; Lohmann y Feichter, 2005) y antropogénicos, como tráfico vehicular, industria y también procesos de combustión del sector residencial. El  $NO_2$  también es un contaminante asociado a la combustión, principalmente de tráfico vehicular, pero también se asocia a la quema de residuos domésticos. Por otro lado, el  $CO$  es otro contaminante cuya emisión está asociada a la combustión del tráfico vehicular y de combustibles sólidos para calefacción doméstica.

Los contaminantes atmosféricos presentan una gran variabilidad espacial y temporal. En zonas urbanas, por ejemplo, los patrones de dispersión de los contaminantes son muy heterogéneos dentro de las ciudades (Zeri et al. 2011, Targino y Krecl, 2015, Targino et al. 2019), ya sea por la influencia de factores naturales (procesos de circulación de microescala, ciclo diario de temperatura, influencia de la radiación y precipitación,

entre otros) como antropogénicos (distintos tipos de fuentes emisoras y combustibles usados, por ejemplo). Por un lado, Lamarque et al. (2010), Zeri et al. (2011), Rozante et al. (2017) señalan al tráfico vehicular como la principal fuente de contaminación atmosférica urbana pero también tienen un gran impacto las emisiones de origen industrial, la quema de basura doméstica y la quema de biomasa (Resquin et al. 2018), siendo esta última práctica muy frecuente como medio de calefacción en Uruguay (MIEM, 2013). Por otro lado, las condiciones meteorológicas locales también condicionan la calidad del aire. Por ejemplo, la variación de la altura de la capa límite atmosférica (CLA, de aquí en adelante) durante el día puede afectar directamente el ciclo diario de concentración de contaminantes: a mayor altura de capa límite se observa disminución en las concentraciones de contaminantes y viceversa (Rozante et al. 2017; Martins et al. 2018; Hernandez et al. 2019).

La asociación entre los efectos de la circulación atmosférica de escala sinóptica con eventos extremos de contaminación atmosférica intensos también ha sido estudiada. Este tipo de eventos ocurren cuando patrones de circulación sinóptica, que permanecen estacionarios durante varios días, transportan contaminantes entre diferentes regiones geográficas, por ejemplo: el transporte de polvo desde el desierto de Sahara hacia países de Centroamérica (Méndez et al. 2018) y el Caribe (Poleo y Briceno-Castillo, 2014) o el evento ocurrido en la primavera boreal de 2006, cuando el transporte de contaminantes originados en los incendios forestales en la región de Europa del este alcanzaron el Ártico (Stohl et al. 2007) y países escandinavos (Targino et al. 2013). Un evento más reciente (junio del 2023) se destacó por afectar notoriamente la calidad del aire de Nueva York y otras ciudades de la costa este de Estados Unidos, debido al transporte de humo originado por los incendios forestales que abarcan aproximadamente 3,8 millones de hectáreas de la provincia de Quebec ubicada en Canadá (Observador, 2023).

En América del sur el efecto del transporte regional de contaminantes a través de grandes distancias provoca efectos negativos sobre la calidad del aire en zonas suburbanas (Targino y Krecl, 2015, de Oliveira et al. 2016, Resquin et al. 2018, Hernandez et al. 2019, Rincón-Riveros et al. 2020), e incluso puede deteriorar la calidad del aire en proporción igual o mayor que la actividad antropogénica local (Martins et al. 2018). En particular, Martins et al. (2018) analizaron dos eventos de alta concentración de aerosoles en la ciudad de Londrina, estado de Paraná (Brasil) y reportaron una contribución del transporte regional de contaminantes en las concentraciones de material particulado con diámetro aerodinámico menor a  $2,5 \mu\text{m}$  ( $MP_{2,5}$ ) mayor al 70 %. También encontraron evidencia de que la fuente de los contaminantes medidos fueron los focos de incendios identificados en la región central de Brasil y que la corriente en chorro de capas bajas (SALLJ, por sus siglas en inglés), que se encontraba activa durante

el desarrollo de los eventos fue la responsable de transportar los contaminantes hacia la región sur de Brasil. Targino et al. (2019) reportaron una fuerte incidencia del transporte regional de contaminantes en el deterioro de la calidad del aire en el estado de San Pablo (Brasil). Los autores indicaron que la contribución en las concentraciones de ozono debido al transporte de contaminantes producto de la quema de biomasa en la región del Amazonia y Cerrado, puede alcanzar entre un 23 y 41 % del total de ozono medido. Además, estudiaron un evento de contaminación en San Pablo, ocurrido en setiembre del 2015 debido al transporte regional y encontraron que las concentraciones de  $MP_{10}$  se duplicaron y triplicaron (dependiendo del sitio de medición) y las de  $MP_{2,5}$  se duplicaron, con respecto a períodos sin evento de contaminación. Durante los días que perduró el evento, condiciones de alta presión se mantuvieron en la zona creando un escenario propicio para desfavorecer la dispersión de contaminantes y generar contaminantes secundarios, como el ozono. Los autores concluyeron que la quema de biomasa originada en otra región puede deteriorar significativamente la calidad del aire en ciudades pequeñas y grandes y que la duración de los eventos de contaminación está asociada a la persistencia de la situación sinóptica que la enmarca.

Para regiones próximas a Uruguay existen estudios sobre el impacto de la llegada de partículas originadas por quema de biomasa en otras regiones. Por ejemplo, de Oliveira et al. (2016) reportó evidencia de aumento del espesor óptico atmosférico (AOD, por sus siglas en inglés) en Río Grande del Sur (Brasil) asociado al transporte de partículas originadas por quema de biomasa en la región central de Brasil. Para la región metropolitana de Buenos Aires (Argentina) Ulke (2019) también encontró un aumento significativo en el AOD asociado a partículas originadas por las actividades de quema de biomasa en la región central del continente, las cuales llegaron a la región de estudio por la corriente en chorro de capas bajas. Resquin et al. (2018) indicaron presencia de partículas de carbono negro asociado también a actividades de quema de biomasa, proveniente de la región norte de Argentina y Paraguay, principalmente.

Para Uruguay, son escasos los estudios que relacionan el comportamiento de los parámetros indicadores de la calidad del aire y los distintos fenómenos de circulación atmosféricos. En primer lugar, no hay estudios científicos publicados sobre el comportamiento climatológico de los contaminantes atmosféricos en el país y en segundo lugar, hay pocos trabajos publicados relacionados al transporte de estos contaminantes originados en otras regiones, a pesar de que año a año los medios de comunicación anuncian la llegada de humo generado en incendios forestales en países vecinos (NCC, 2019; Observador, 2021; Fest, 2020). El antecedente más cercano es el trabajo de Zunckel et al. (2003) que reportó la presencia de partículas de cenizas en muestras de agua de lluvia recopiladas en la región noreste de Uruguay, las cuales fueron identificadas como provenientes de las quemadas detectadas en la región central del

continente americano días previos a los eventos de lluvias estudiados.

En vista de lo anterior, los objetivos planteados para este trabajo son los siguientes: estudiar la relación entre contaminantes y las condiciones meteorológicas sinópticas presentes y estudiar el rol del transporte regional de contaminantes en generar eventos de contaminación en la zona centro-oeste de Uruguay. El desarrollo de la tesis se divide en dos etapas: en la primera, se realiza un análisis exploratorio del comportamiento climatológico de tres parámetros indicadores de la calidad del aire,  $CO$ ,  $MP_{10}$  y  $NO_X$ , en el período desde el 1 de enero del 2008 al 31 de diciembre del 2018. A partir de estas tres series de datos, se estudia la variabilidad interanual e interestacional de los contaminantes y su ciclo diario y mensual. La segunda etapa se concentra en el trimestre JJA (cuando los valores de contaminantes alcanzan los máximos anuales, según la climatología construida en la primera etapa) y los análisis realizados se dividieron en dos partes. En la primera, se identificaron las condiciones sinópticas que enmarcan dos eventos de contaminación que se desarrollaron en junio-julio-agosto, uno de ellos asociado a fuentes locales de emisión y el otro en el cual el transporte regional de contaminantes juega un rol preponderante. En la segunda parte, se generaliza el estudio de los eventos considerados en la primera parte: se analizó la relación entre patrones de circulación sinóptica característicos de la región y el desarrollo de eventos de contaminación generados por fuentes locales de emisión y por transporte regional de contaminantes.

Para finalizar, esta monografía se organiza de la siguiente forma: el capítulo uno presenta la introducción de la tesis; luego del capítulo introductorio, el capítulo dos presenta el marco teórico, que da contexto a los conceptos de calidad de aire y a la relación entre procesos meteorológicos y la calidad del aire. El capítulo tres presenta la propuesta de la problemática y objetivos de la tesis. En el capítulo cuatro se describen los datos y métodos utilizados; luego, en el capítulo cinco, se describen los resultados del análisis exploratorio realizado en la primera etapa de estudio. En el capítulo seis, se presentan los resultados de los análisis de la segunda etapa, donde se estudian dos eventos de contaminación de distinto origen y la relación entre eventos de contaminación y patrones de circulación sinópticos. Para finalizar, en el capítulo siete, se presentan las conclusiones y trabajos a futuro que pudieran desarrollarse en base a los resultados obtenidos en este trabajo.

# Capítulo 2

## Marco teórico

El acceso al aire limpio es considerado un derecho fundamental y una necesidad para el ser humano (World Health Organization, [2018a](#)). El deterioro de la calidad del aire, principalmente en regiones urbanas, se convirtió en una preocupación para diferentes organizaciones a nivel nacional e internacional, la comunidad científica y la sociedad en general, principalmente luego de que algunos eventos de contaminación atmosférica intensos provocaron miles de muertes prematuras, como los eventos de smog fotoquímico en Londres (1950), en Los Angeles durante la década del 50 y en Nueva York (1963), entre otros (Platt y Stutz, [2008](#)). Otro evento que generó preocupación sobre el efecto antropogénico en la composición química de la atmósfera fue el descubrimiento del debilitamiento de la capa de ozono estratosférico. Esta capa retiene los rayos UV que son parte del espectro de radiación solar que llega a la atmósfera terrestre y los efectos sobre la salud humana de este tipo de radiación es bien conocido, siendo el cáncer de piel uno de los efectos más severos y de los tumores más frecuentes en humanos (González-Púmariega et al. [2009](#)). El descubrimiento del debilitamiento de la capa de ozono estratosférico impulsó la generación de políticas internacionales para reducir y mitigar el impacto de las emisiones de origen antropogénico, como fue el Protocolo de Montreal (1987).

Por lo tanto, fue necesario profundizar en el conocimiento de los efectos de los contaminantes sobre la salud humana y el ambiente. También se profundizó en el conocimiento sobre los procesos químicos y físicos que condicionan la calidad del aire y como ésta es afectada por las condiciones meteorológicas tanto a nivel local como regional. Este tipo de conocimiento es necesario para poder generar políticas que permitan minimizar el impacto de la contaminación atmosférica en los seres vivos y en el ambiente y gestionar de forma eficiente las emisiones atmosféricas.

## 2.1. Contaminantes atmosféricos

Se define la contaminación atmosférica como la presencia de sustancias y/o tipos de energías (calor, ruido, etc.) en la atmósfera, en cantidades, niveles y duración que implique molestias o riesgo para la salud de las personas y de los demás seres vivos, así como que puedan generar deterioro en bienes materiales y la calidad de vida de la población (Martínez y Díaz de Mera, 2004). Las sustancias contaminantes se pueden clasificar de diversas formas:

- Por el momento de su generación: contaminantes primarios o secundarios;
- Por las características de la fuente:
  - Según su ubicación en el espacio: Fuentes fijas o móviles;
  - Según su origen: Fuentes naturales o antropogénicas;
  - Según la relación entre la dimensión de la fuente y el área a evaluar: Fuente puntual, lineal o de área;
- Por su estado físico en el ambiente: gases, vapores, aerosoles;
- Según su naturaleza química: compuestos de azufre, compuestos inorgánicos de carbono, compuestos de nitrógeno, oxidantes fuertes, compuestos orgánicos, metales, agentes biológicos;
- Según sus efectos: irritantes, tóxicos sistémicos, anestésicos, cancerígenos, alérgenos, patógenos, asfixiantes, efectos combinados.

Las principales fuentes de contaminantes atmosféricos identificadas son:

- la combustión: de carbón mineral, gas natural, combustibles fósiles, etc;
- procesos industriales de distinta naturaleza;
- incendios forestales, ya sea originados naturalmente o por acción humana;
- ambientes marinos costeros y continentales;
- erupciones volcánicas;
- resuspensión de material particulado del suelo;
- reacciones químicas en la atmósfera (generación de contaminantes secundarios).

La OMS ha generado Guías de Calidad del Aire donde se establecen valores de calidad objetivo para ciertos contaminantes, llamados *contaminantes criterio*. Esos valores fueron fijados a partir de estudios científicos sobre los efectos nocivos de la exposición a los contaminantes en la salud humana, la flora y fauna y tienen el objetivo de orientar a los países en diversas formas de reducir las concentraciones de los contaminantes atmosféricos. Estas guías fueron publicadas por primera vez en el año 1987 pero fueron actualizadas (año 1997, 2000, 2005) a medida que ha aumentado el conocimiento en esta área. Por esta razón, los países pueden establecer límites restrictivos si entienden

que los propuestos en estas guías no aseguran la salud y calidad de vida de la población. Los contaminantes criterio considerados en las guías de la OMS son los siguientes:  $NO_2$ ,  $CO$ , material particulado,  $SO_2$ ,  $O_3$  ([https://www.who.int/es/news-room/factsheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/factsheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)). En esta tesis los análisis realizados se enfocaron en estudiar tres contaminantes en particular:  $NO_x$  (ver sección 2.1.1),  $CO$  y  $MP_{10}$ , por lo que a continuación se describen las características de estas sustancias, efectos y fuentes asociadas.

### 2.1.1. Óxidos de nitrógeno: $NO_x$

Se pueden encontrar varias especies de óxidos de nitrógeno en la atmósfera, pero las principales son: óxido nítrico ( $NO$ ), dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) y óxido nitroso ( $N_2O$ ), ver Zaror (2002). Además, el radical nitrato ( $NO_3$ ) cumple un rol de importancia en las reacciones químicas que ocurren durante la noche (Manahan, 2022). Comúnmente se denomina  $NO_x$  a la suma del  $NO$  y  $NO_2$  (Seinfeld y Pandis, 2008).

El  $N_2O$  es un gas relativamente poco reactivo y se encuentra en concentraciones muy bajas en la atmósfera. Proviene fundamentalmente de fuentes naturales (Zaror, 2002), es un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento 250 veces mayor al  $CO_2$  y tiene un tiempo de vida en la atmósfera mayor a 100 años (EPA, 2021b). El  $NO_2$  tiene olor característico y es de color rojizo, mientras que el  $NO$  es incoloro e inoloro. Estos gases llegan a la atmósfera por fuentes naturales (se generan a partir del  $N_2$  y  $O_2$  en presencia de descargas eléctricas y a través de procesos biológicos) y en zonas urbanas, el tráfico vehicular es de las principales fuentes de  $NO_x$  (Manahan, 2022).

Los  $NO_x$  llegan a la atmósfera en forma primaria como  $NO$  y rápidamente se convierten en  $NO_2$ . En líneas generales, una vez que los gases calientes de los escapes se mezclan con el aire, parte del  $NO$  se oxida:



A su vez, el  $NO_2$  reacciona rápidamente en presencia de radiación en el espectro de la luz visible y ultravioleta, generando  $NO$  como producto de la reacción:



Paralelamente, también ocurren otras reacciones que involucran especies orgánicas:

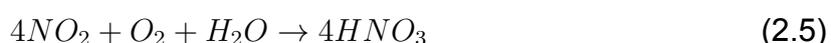


y



Estas reacciones tienen como resultado una rápida conversión entre el  $NO$  y el  $NO_2$  y, en horas del día, la fotodisociación del  $NO_2$  para generar  $NO$  también ocurre en pocos minutos (Manahan, 2022). En horas de la noche, la proporción de  $NO_2$  sobre  $NO$  es mayor debido a que no ocurre la fotodisociación.

El  $NO_2$  puede convertirse en ácido nítrico o sales de nitrato, las cuales sedimentan o son arrastradas por la lluvia:



En cuanto a los efectos por la exposición, la OMS (World Health Organization, 2006) indica que el  $NO_2$  es un gas altamente tóxico para la salud si se presenta en concentraciones mayores a  $200 \mu g.m^{-3}$  durante un período de una hora. También se han reportado estudios epidemiológicos con efectos negativos sobre la salud humana por exposición a largo plazo. Este gas afecta la función pulmonar principalmente en personas que presentan enfermedades pre-existentes como el asma y es mayor el efecto nocivo en niños. Por lo tanto, la OMS estableció un límite de calidad objetivo de promedio anual de  $40 \mu g.m^{-3}$  para la exposición a largo plazo.

### 2.1.2. Material particulado con diámetro aerodinámico menor a $10 \mu m$ : $MP_{10}$

Se define el material particulado menor a  $10 \mu m$  a la porción de partículas sólidas o líquidas con diámetro aerodinámico menor a  $10 \mu m$ . La Guía de Calidad del Aire de la OMS (World Health Organization, 2006) indica que la importancia de este contaminante radica en que esta porción de partículas penetra con más facilidad en el sistema respiratorio. El origen de la fracción de partículas con diámetro aerodinámico entre  $2,5$  y  $10 \mu m$  está asociado a procesos mecánicos como resuspensión del polvo asentado en las calles, obras de construcción, arrastre por el viento. La porción más fina de partículas, o sea, las que tienen un diámetro aerodinámico menor a  $2,5 \mu m$  ( $MP_{2,5}$ ) se generan principalmente como producto de la combustión. La proporción de  $MP_{2,5}/MP_{10}$  depende de las fuentes, la meteorología y la geografía de cada sitio, siendo generalmente mayor la proporción de  $MP_{2,5}$  en zonas urbanas, donde el tráfico vehicular es intenso: en países en desarrollo la tasa característica alcanza un valor de  $0,5$  y en países más desarrollados puede alcanzar hasta  $0,8$  (World Health Organization, 2006).

Estudios epidemiológicos sobre los efectos en la salud frente a la exposición a altas concentraciones de partículas a largo plazo, identificaron una asociación robusta y significativa entre el aumento de la concentración de partículas en la atmósfera y el aumento de la mortalidad debido a enfermedades cardiopulmonares y cáncer de pulmón, principalmente si se trata de partículas finas (Dockery et al. 1993, C. A. Pope et al. 1995, Pope III et al. 2002, Laden et al. 2006, Turner et al. 2011, Lefler et al. 2019). Por lo tanto, teniendo en cuenta los resultados de los estudios epidemiológicos en base a las partículas finas es que la OMS estableció límites de calidad objetivo para la exposición a  $MP_{10}$ , en función de fijar una relación entre  $MP_{2,5}/MP_{10}$  de 0,5: el valor límite para el promedio anual es de  $20 \mu g.m^{-3}$  y para el promedio diario es de  $50 \mu g.m^{-3}$ .

Por otro lado, se han identificado efectos sobre el clima por la presencia de partículas de origen natural y antropogénico, ya que afectan el balance radiativo del sistema climático con feedbacks positivos y negativos. Dentro de los forzantes positivos se encuentran el carbón negro proveniente de la quema de combustibles fósiles y biomasa (Haywood y Boucher, 2000) y los aerosoles antropogénicos que contienen nitratos y amonios (Jacobson, 2001). En cuanto a los forzantes negativos, se describe el carbón orgánico proveniente de la quema de biomasa, los aerosoles con sulfatos de origen antropogénico, compuestos orgánicos provenientes de la quema de combustibles fósiles (Haywood y Boucher, 2000), entre otros.

### 2.1.3. Monóxido de Carbono: CO

Este gas se caracteriza por ser incoloro e inoloro y es emitido por fuentes tanto naturales como antropogénicas (EPA, 2000). Dentro de los procesos antropogénicos que lo generan está la combustión incompleta de combustibles fósiles y la quema de biomasa. También se genera como producto secundario durante el proceso de oxidación fotoquímica de hidrocarburos en  $CO_2$ . Dentro de las fuentes naturales se encuentran la emisión de la vegetación como producto metabólico y la foto-oxidación de la materia orgánica que se encuentra en la superficie de los cuerpos de agua y del suelo. La principal fuente de combustión de combustibles fósiles son los motores vehiculares y como fuentes fijas las de mayor importancia son la combustión de origen doméstico, calderas ineficientes, pequeñas industrias, cuya tecnología no es adecuada para realizar procesos mas eficientes. La quema de biomasa es otra fuente de emisión de importancia y se refiere a la quema de bosques, residuos domésticos y calefacción, entre otros. En el documento de EPA (2000) se indica que la variabilidad espacial y temporal que presenta este gas es significativa pero el promedio global del tiempo de vida medio en la atmósfera del  $CO$  es aproximadamente de dos meses.

En cuanto a los efectos sobre la salud humana, la exposición a este gas produce pro-

blemas respiratorios y cardiopulmonares. El  $CO$  afecta la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre debido a que el oxígeno es transportado hacia las células del cuerpo por medio de la hemoglobina, pero la afinidad con el  $CO$  es 200 veces mayor que la afinidad con el oxígeno (World Health Organization, 2000). Por lo tanto, en presencia de  $CO$ , este gas será rápidamente distribuido por el cuerpo por medio de la circulación sanguínea. La exposición a bajas concentraciones puede afectar principalmente a los órganos que tienen gran consumo de oxígeno (como el cerebro y el corazón) y en el caso de la exposición de mujeres embarazadas, puede llegar al feto en desarrollo. Para finalizar, la exposición a altas concentraciones de  $CO$  puede provocar la muerte por asfixia.

## 2.2. Relación entre las variables meteorológicas y la calidad del aire

La presencia de contaminantes en la capa baja de la atmósfera depende de la tasa de emisión de estos y de las condiciones meteorológicas, como: perfil vertical de temperatura, velocidad del viento, lluvia, radiación solar, presión, humedad atmosférica (Zeri et al. 2011, Fortelli et al. 2016). Estas variables tienen una gran influencia en el proceso de transporte, dispersión, transformación y generación de contaminantes secundarios y remoción o acumulación de los contaminantes atmosféricos (Solomon et al. 2000, Jeong y Park, 2013, de Foy et al. 2006, Bei et al. 2013, Zeri et al. 2011, Rozante et al. 2017, entre otros). El perfil vertical de temperatura determina la estabilidad atmosférica y por lo tanto controla el espesor de la capa límite atmosférica (CLA). Las condiciones más favorables para la dispersión de contaminantes ocurren bajo fuerte inestabilidad y CLA profunda mientras que una atmósfera estratificada, con fuerte estabilidad y CLA poco profunda se opone a la dispersión de los contaminantes presentes (Holton, 1973; Seinfeld y Pandis, 2008). La velocidad del viento es otro factor que condiciona la cantidad de contaminantes presentes (Holton, 1973; Seinfeld y Pandis, 2008) ya que estos se dispersan mecánicamente cuando son arrastrados por el viento.

La combinación de estos dos parámetros definen el potencial de contaminación atmosférica (Gassmann y Mazzeo, 2000). Esto es una medida de la capacidad de la atmósfera de concentrar o diluir la cantidad de contaminantes presentes. Gassmann y Mazzeo (2000), reportan que, en condiciones de CLA poco profunda y viento medio de la capa intenso, se genera el mismo efecto en la dispersión de los contaminantes que en condiciones de CLA más profunda y viento medio de la capa más débil. También establecen criterios para definir las condiciones para alcanzar un alto potencial de contaminación atmosférica: altura de CLA menor o igual a 1500 metros y un viento medio de la capa menor o igual a  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , en días sin precipitaciones. Además, en

Mazzeo y Venegas (2004), reportan como criterio para el pronóstico de potencial de contaminación alto una altura de CLA menor a 1500 m que, sumado a velocidad de viento calmo a débil, enmarcan condiciones para generar condiciones de baja calidad del aire en zonas urbanas.

Otros autores también han definido otros índices para cuantificar el potencial de la contaminación atmosférica, en base a variables meteorológicas diferentes, por ejemplo: temperatura y viento zonal a 900 mb (Rutllant y Garreaud, 1995), relación entre concentraciones de contaminantes medidos bajo condiciones meteorológicas presentes versus concentraciones de contaminantes medidos en condiciones atmosféricas estándar (Xu y Zhu, 2000). Estos índices se basan en que también hay una relación directa entre otras variables meteorológicas (como presión, precipitación, radiación) y la dispersión, acumulación y/o generación de contaminantes.

Las condiciones meteorológicas locales responden a la situación sinóptica que las enmarca, por lo que la relación entre sistemas de escala sinóptica y la concentración de contaminantes es cercana. En el trabajo publicado por Zeri et al. (2011) se indica que sistemas de escala sinóptica como frentes, ciclones, anticiclones, pueden afectar la concentración de los contaminantes en capas bajas de la atmósfera hasta por varios días. Por ejemplo, el pasaje de un frente es un fenómeno que favorece la dispersión de los contaminantes ya que tiene asociado fuertes vientos y precipitaciones (que favorecen la deposición húmeda), mientras que la alta nubosidad reduce la incidencia de radiación solar y por lo tanto, la generación de contaminantes secundarios. Por otro lado, un sistema de alta presión que permanece estacionario o cuasi-estacionario por varios días se opone al proceso de dispersión de contaminantes ya que la subsidencia genera una alta estabilidad atmosférica. Otros autores también han publicado que bajo la influencia de un sistema de alta presión se dan condiciones desfavorables para la dispersión de los contaminantes (Fortelli et al. 2016, Holton, 1973): vientos débiles y compresión adiabática se oponen a la dispersión vertical, baja probabilidad de tormentas y lluvias por lo que no se genera deposición húmeda de aerosoles; además, la baja nubosidad permite mayor incidencia de radiación solar que actúa como catalizador para la generación de contaminantes secundarios como el ozono (L. Shen y Mickleby, 2017, Shu et al. 2020).

Por lo tanto, usar la clasificación de sistemas sinópticos en patrones característicos que describan la variabilidad del comportamiento atmosférico, ha sido una técnica efectiva en el estudio de la relación entre los fenómenos de escala sinóptica y el comportamiento de contaminantes atmosféricos (Rutllant y Garreaud, 1995; Fortelli et al. 2016; Crawford et al. 2016; Shu et al. 2020; Han et al. 2018; Li et al. 2019; Mao et al. 2020; Shu et al. 2020; Rojas et al. 2020; Salvador et al. 2021, entre otros), especialmente en latitudes medias y altas.

Este tipo de análisis se ha llevado a cabo usando distintas variables para la clasificación de los patrones sinópticos como, por ejemplo, presión a nivel del mar, altura geopotencial, campo de vientos en distintos niveles (Han et al. 2018). Además se ha aplicado en distintas regiones del mundo: China (Bei et al. 2016; Han et al. 2018; Li et al. 2019; Han et al. 2020), Taiwan (Hsu y Cheng, 2019), Europa (Thomas y Devasthale, 2014; R. Pope et al. 2014; Hsu y Cheng, 2019; Salvador et al. 2021), América (Rutllant y Garreaud, 1995; Hegarty et al. 2007; L. Shen et al. 2015), entre otros.

Algunos autores profundizaron en este análisis y estudiaron la relación entre la persistencia de los patrones sinópticos y la presencia de contaminantes. Por ejemplo, Han et al. (2018) reportaron que bajo la influencia de patrones sinópticos dominados por una circulación anticiclónica persistente por siete días, aumenta la anomalía de concentración de  $CO$  de 10 a 15 % sobre el valor medio climatológico. En Thishan et al. (2010) se reportan resultados similares al estudiar la relación entre la persistencia de patrones sinópticos de circulación y concentración de material particulado sobre Estados Unidos. En las regiones bajo la influencia de circulación anticiclónica por varios días se produce la acumulación de partículas debido a las condiciones de estabilidad atmosférica, vientos débiles y poca precipitación asociada al sistema que gobierna la dinámica regional. Por el contrario, bajo la influencia de sistemas ciclónicos durante varios días, se produce el efecto de dilución de los contaminantes debido a las condiciones de inestabilidad, altas precipitaciones y vientos fuertes asociados.

### **2.3. Antecedentes en América del sur**

Los diferentes estudios sobre la relación entre la calidad del aire y las condiciones meteorológicas locales en regiones de América del Sur coinciden en que hay una gran variabilidad espacio-temporal en el comportamiento de los contaminantes atmosféricos. Por ejemplo, Rozante et al. (2017) estudiaron la variabilidad temporal y espacial de la concentración de  $CO$  en la ciudad de San Pablo, Brasil. Por un lado, encontraron que los sitios cercanos a avenidas muy transitadas mostraban hasta un 50 % más en la media de concentración que en el sitio de medición ubicado en un parque, atribuible a la influencia de la emisión por el tráfico vehicular. La marcha anual muestra que los valores medios mensuales son más altos en los meses fríos (desde junio a agosto) y mas bajos en los cálidos (desde noviembre a febrero). Este resultado se debe a que durante el verano se registra mayor temperatura media y altas tasas de precipitación que generan condiciones de inestabilidad atmosférica, favoreciendo la dispersión de contaminantes a través de los procesos convectivos y turbulentos que ocurren en la capa límite. Por otro lado, durante el invierno, menos precipitación, alta presión y bajas temperaturas generan condiciones de estabilidad atmosférica que favorecen la acu-

mulación de los contaminantes en la capa mas baja de la atmósfera. A nivel del ciclo diario, se observan picos de concentración en horas de la mañana y en la noche. El de la mañana fue asociado a la combinación de la emisión del tráfico vehicular durante la hora pico sumado a que la CLA se encuentra poco desarrollada; a partir del medio día, este efecto se ve suavizado, ya que la altura de la CLA comienza a aumentar. Por último, en horas de la noche se registra el segundo pico diario debido al poco desarrollo de la CLA.

En el estudio publicado por Zeri et al. (2011) también se destaca la variabilidad espacial en las concentraciones de  $CO$ , material particulado y  $SO_2$  observada en la ciudad de Rio de Janeiro, Brasil. Estos autores encontraron una fuerte influencia asociada a las fuentes de emisión (tráfico vehicular y procesos industriales) durante el ciclo diario y semanal de la concentración de contaminantes. También encontraron una correlación entre concentración y algunas variables meteorológicas (temperatura y déficit de presión de vapor) y una clara estacionalidad en el ciclo anual, siendo los valores máximos de concentración observados en el invierno del hemisferio sur, cuando las temperaturas son mínimas y los valores de velocidad de viento, en promedio, son más débiles. Por último, los autores realizaron un análisis de frecuencias a la serie de material particulado y encontraron una señal de escala temporal de 1 a 8 días, principalmente durante el invierno, asociada a fenómenos de escala sinóptica como el pasaje de frentes, la influencia del anticiclón subtropical del Atlántico sur, que en invierno se encuentra mas cerca del continente.

Rojas et al. (2020) también analizaron la relación entre las variables meteorológicas locales y las concentraciones de  $MP_{10}$ ,  $CO$  y  $NO_2$  en tres estaciones en la ciudad de Buenos Aires: una de ellas ubicada muy cercana a un parque, en una zona residencial (CEN), la segunda estación ubicada sobre una avenida muy transitada (COR) y la tercera ubicada sobre la costa (BOC). Los autores destacaron que los tres contaminantes muestran valores altos de concentración con registros de velocidad de viento débiles; esta variable es la que muestra mayor influencia sobre los contaminantes, independientemente de los sitios donde se midan. También que la concentración de partículas es inversamente proporcional a los valores de humedad relativa y de cobertura nubosa y esta relación se atribuye el efecto de la remoción del contaminante por la lluvia, mientras que este efecto es menos notorio sobre la concentración de  $NO_2$  y casi nulo sobre el  $CO$ . Por otro lado, el percentil más alto de concentración de  $CO$  y  $NO_2$  ocurre en condiciones de temperaturas bajas, lo cual coincide con los resultados mostrados en los estudios de Zeri et al. (2011) y Rozante et al. (2017). Por último, se realizó un análisis de cluster con los perfiles diarios de dirección y velocidad de viento y como resultado se obtuvieron cinco grupos que caracterizan la evolución diaria del viento. El cluster 1 (viento proveniente del sector noreste) y el cluster 2 (viento proveniente

del sector sureste) representan la entrada de aire más limpio proveniente del mar, por efecto de la brisa marina. El cluster 3 representa la entrada de frentes fríos desde el suroeste y está asociado al transporte de aerosoles desde la región continental hacia la ciudad de Buenos Aires. En cuanto al cluster 4, representa un perfil de vientos proveniente del sector noroeste; en este caso se pueden identificar en las mediciones de los tres contaminantes la influencia de las fuentes urbanas de emisión. El cluster 5 es el que representa un perfil de viento más débil que los cluster 1 al 4. Por último, los autores analizan el efecto de la persistencia hasta cinco días de los diferentes regímenes diarios de viento y encontraron una correlación positiva significativa entre los valores de concentración media de  $MP_{10}$  y persistencia del cluster 5 (caracterizados por velocidades bajas de viento) y correlación negativa significativa con la persistencia del cluster 2 (asociado a viento proveniente del sureste), en los tres sitios estudiados. Las concentraciones medias de  $NO_2$  también muestran correlación negativa significativa entre los valores de concentración media y persistencia del cluster 1 (asociado a viento proveniente del noreste) en los tres sitios.

Otros estudios también se han enfocado en estudiar la variabilidad espacio temporal de contaminantes como carbón negro, ozono, óxidos de nitrógeno y material particulado en Buenos Aires (Resquin et al. 2018), San Pablo y Paraná (Targino y Krecl, 2015, Targino et al. 2019). Los autores identificaron la influencia de la fuente local de emisión en el comportamiento de los ciclos diarios de concentración de contaminantes: picos durante la mañana asociados al aumento del tráfico vehicular y durante los fines de semana los ciclos diarios de concentración se ven menos marcados. También identificaron el efecto de las condiciones meteorológicas, por ejemplo, ciclos diarios de concentración más débiles en la temporada lluviosa con respecto a los ciclos diarios en la temporada seca. Además, los distintos autores destacan el aporte del transporte regional de contaminantes originados por quema de biomasa en la región central y norte de América del sur, en las mediciones de los sitios urbanos. Por un lado, las concentraciones de carbono negro aumentaron alrededor de un 50 % en la región metropolitana de Buenos Aires (Resquin et al. 2018) y se detectó que las concentraciones de  $MP_{10}$  se duplicaron y triplicaron; en diferentes sitios del estado de San Pablo las concentraciones de  $MP_{2,5}$  se duplicaron y las de  $NO_x$  aumentaron entre 1,4 y 3,5 veces (Targino et al. 2019), durante un evento de transporte regional de contaminantes.

El transporte de contaminantes producto de la quema de biomasa desde la región centro-norte de América hacia el sur de Brasil, Argentina, Paraguay y Uruguay ha sido asociado a fenómenos de escala sinóptica típicos de la región. Freitas et al. (2005) destaca la influencia del anticiclón semipermanente sobre el océano Atlántico en el transporte de contaminantes desde la región amazónica hacia el sur de Brasil. Este sistema es el responsable de generar un corredor por el cual el humo, en capas bajas

de la atmósfera, es advechado desde la región central de América del Sur en dirección oeste por los vientos alisios; al chocar con la barrera geográfica de los Andes, gira en dirección sureste y es exportado del continente por la región sureste de América del Sur. Por lo tanto, el sistema identificado es la SALLJ, que gobierna el corrimiento de la trayectoria del humo advechado sobre el sur de Brasil, Uruguay o Argentina. Por otro lado, los sistemas transientes, como el ingreso de frentes desde el suroeste, favorecen la entrada de aire limpio desde latitudes mayores por el sur del continente americano.

Ulke et al. (2007) analiza también el rol de la presencia de la SALLJ en el transporte de contaminantes hacia el sudeste de América del sur. En Ulke et al. (2011) se realiza un análisis de dos eventos de transporte regional en América del sur y se encontró que el evento que se desarrolló entre el 23 y el 28 de agosto del 2002 estaba caracterizado por la presencia de un jet de capas bajas muy intenso de gran extensión meridional que advechó el humo originado en la región tropical de América del sur, hasta alcanzar latitudes medias en los 40°S. El humo alcanzó el océano Atlántico a través de la región sur de América del sur. Por otro lado, un evento detectado en octubre del mismo año, tuvo una duración menor debido a la influencia del pasaje de un frente frío que provocó que el humo alcanzara el océano Atlántico por la zona del sureste de Brasil. También Ulke (2019) reporta evidencia del aumento en el AOD sobre la ciudad de Buenos Aires, asociado al transporte de contaminantes a través del SALLJ, originados en las quemadas de biomasa durante el trimestre agosto, setiembre y octubre, particularmente en los casos donde la salida del SALLJ se da en la región del Río de la Plata y sin registros de lluvias durante los episodios.

de Oliveira et al. (2016) reportó valores de AOD que indicaban la presencia de partículas producto de la quema de biomasa en el este de Argentina, Paraguay, sur del Mato Grosso del Sur y Río Grande del Sur, para el trimestre junio-julio-agosto. Estos resultados dan a entender que Uruguay también es receptor de los contaminantes originados por quemadas de biomasa ya que en ambas investigaciones se indica que el factor principal de transporte es la circulación de gran escala que afecta la región, en particular, la presencia del anticiclón semipermanente ubicado al este del continente americano y la SALLJ activa.

En Uruguay, Zunckel et al. (2003) reportó la presencia de hollín en muestras de agua de lluvia recopiladas en la región noreste de Uruguay. A partir del análisis de la composición química de las muestras y de la identificación de las trayectorias de las parcelas que alcanzaron la región durante un evento de lluvia a través del modelo HYSPLIT, se concluyó que las partículas de hollín se originaron por quema de biomasa en la región central de Brasil y se transportaron sobre regiones con focos de incendios activos hasta que finalmente alcanzaron la región noreste de Uruguay. Una vez que arribaron a la zona de estudio fueron arrastradas por el evento de lluvia y depositadas en el suelo.

# Capítulo 3

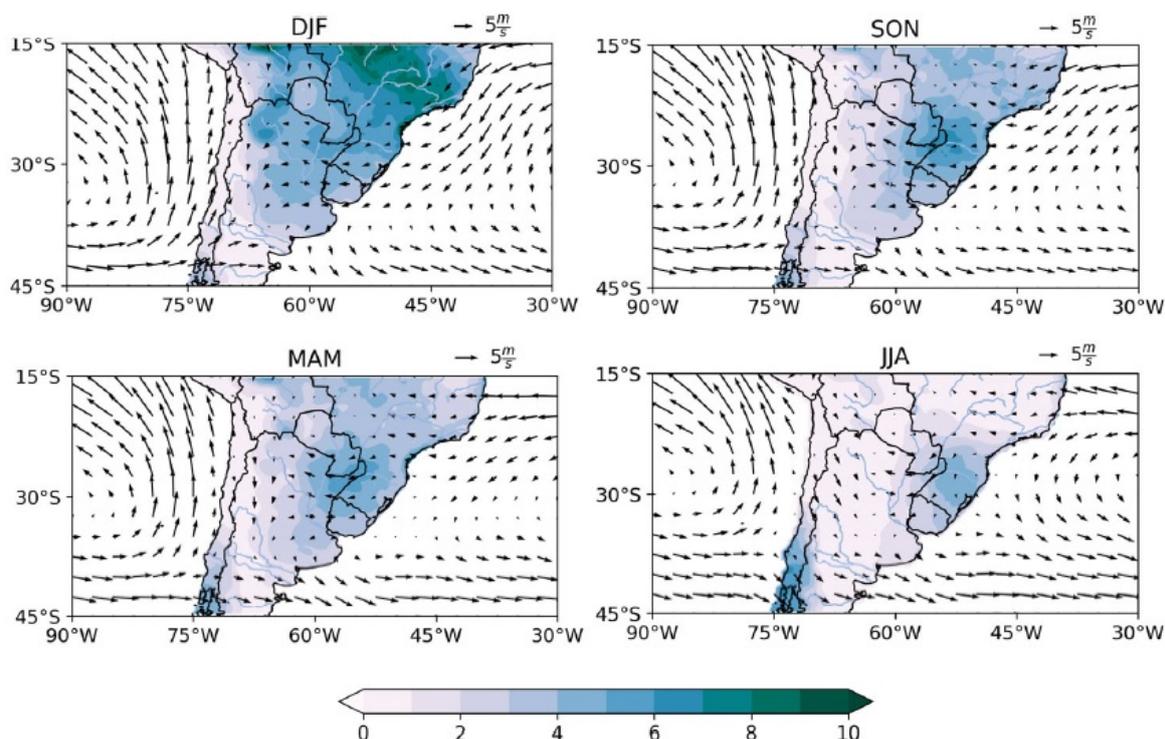
## Presentación del problema y objetivos

A continuación se caracteriza la zona de estudio así como las fuentes de emisión identificadas en Uruguay y, particularmente, en la región estudiada. Para finalizar este capítulo se describen los objetivos generales y específicos de la tesis.

### 3.1. Descripción del problema

La región sureste de América del sur, donde se encuentra ubicado Uruguay, está influenciada por una circulación de vientos en superficie con características estacionales. La Figura 3.1 muestra la climatología de vientos en el nivel 1000 hPa y la precipitación media acumulada por día sobre el continente, por trimestre (figuras tomadas de Arizmendi et al. 2022). En las imágenes se destaca la presencia de dos anticiclones semi-permanentes posicionados sobre el océano Atlántico y el océano Pacífico, los cuales se mueven meridionalmente a lo largo del año: durante la estación fría, en promedio, se desplazan hacia el norte y en la estación cálida se desplazan hacia latitudes mayores. Uruguay se ve influenciado por el sector occidental del anticiclón ubicado sobre el océano Atlántico, generando en el verano viento persistentes del sector noreste. En invierno la variabilidad diaria de los vientos es mayor tanto en intensidad como en dirección. También se puede observar que en DEF se registran los valores máximos de precipitación por día, principalmente en la región centro-norte del país, mientras que en el trimestre JJA se registran los mínimos estacionales de precipitación por día. Este régimen promedio de lluvia a lo largo del año favorece la dispersión de contaminantes principalmente en la estación cálida.

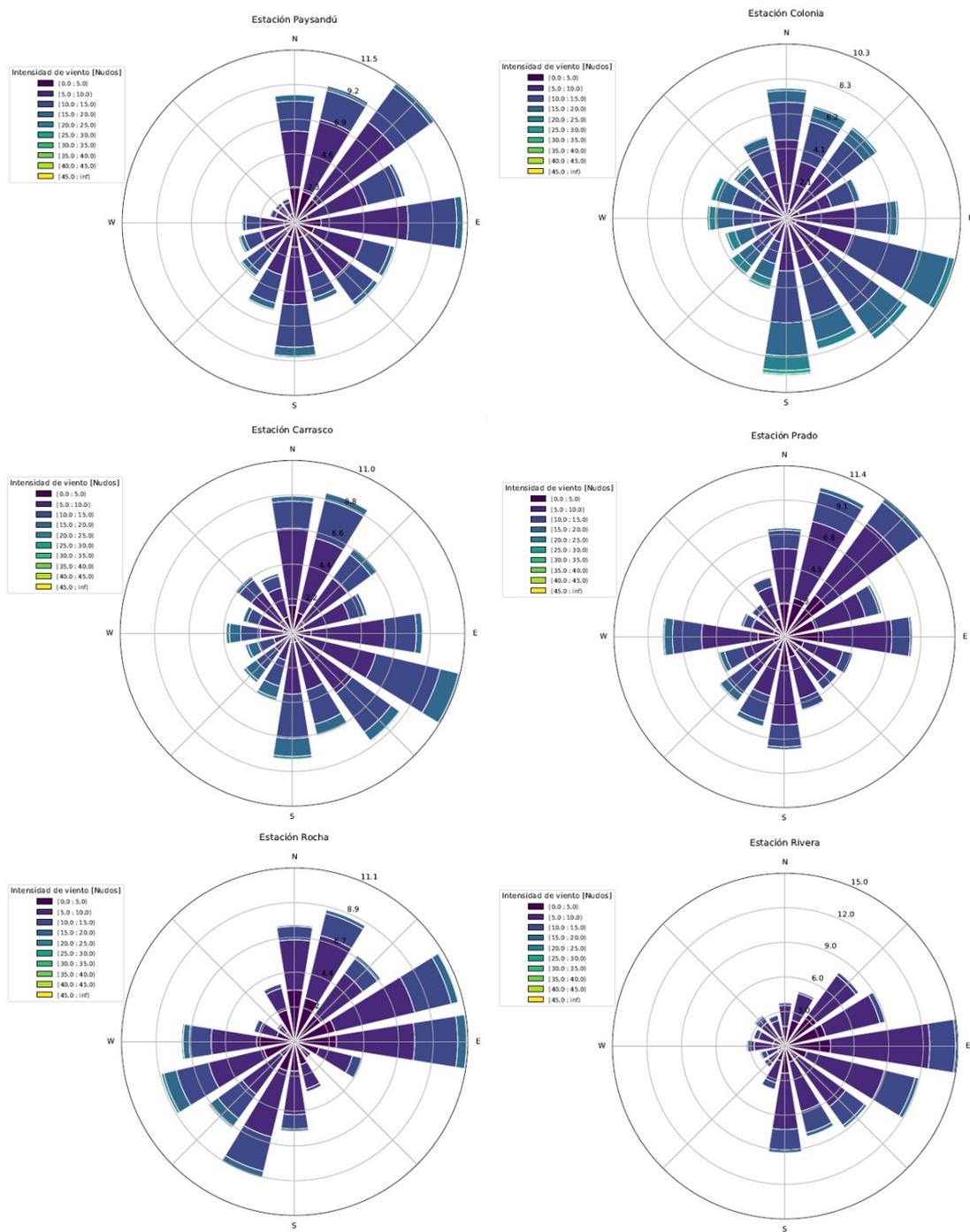
Por otro lado, la geografía del territorio uruguayo favorece la dispersión de los contaminantes emitidos a la atmósfera ya que su terreno se caracteriza por ser suavemente ondulado, cuyo punto mas alto es el cerro Catedral con 513 metros de altura, por lo que no hay grandes obstáculos geográficos que actúen como barreras para la dispersión



**Figura 3.1:** Climatología de los vientos en nivel 1000 hPa y precipitación ( $mm.da^{-1}$ ), por trimestre: DEF, MAM, JJA, SON. Fuente: Arizmendi et al. (2022)

de los contaminantes. Además, Uruguay está ubicado en una región de gran actividad de fenómenos de escala sinóptica, por lo que el pasaje frecuente de sistemas frontales favorece la intrusión de aire limpio desde latitudes mayores. También se ve influenciado por el efecto de procesos de mesoescala, como la brisa marina. El efecto de este fenómeno puede penetrar hasta 60 km tierra adentro, principalmente en el trimestre DEF (Manta, 2017), favoreciendo la intrusión de aire marino mas limpio en la región costera.

Los registros de viento horario en distintas zonas de Uruguay también muestran que se dan condiciones favorables para la dispersión de contaminantes, principalmente en las zonas costeras del Río de la Plata y océano Atlántico. La Figura 3.2 muestra las rosas de viento horarias a nivel anual en distintas regiones de Uruguay (Barreiro et al. 2021). Se puede observar que en la región noreste del país (representada por la estación Rivera) es donde hay menos frecuencia de ocurrencia de registros de valores altos de velocidad de vientos, o sea, mayores a 10 nudos (lo cual es equivalente a 5,1 m/s) pero en el resto de los sitios se observaron con mas frecuencia vientos con velocidades mayores. Es importante recordar que en Gassmann y Mazzeo (2000) se establece el valor de 4 m/s como un umbral para definir un alto potencial de contaminación atmosférica (junto con una altura de la CLA menor a 1500m), por lo que una de las condiciones que define escenarios de bajo potencial de contaminación atmosférica son mas comunes en la región costera uruguaya.



**Figura 3.2:** Rosas horarias de viento en distintas regiones de Uruguay (tomadas de Barreiro et al. 2021).

En Uruguay existe una gran variabilidad espacio-temporal en la carga de contaminantes atmosféricos y las imágenes de satélite muestran evidencia de ello. El AOD es una medida de la extinción de la radiación solar en la columna atmosférica debido al scattering y absorción por los aerosoles presentes (<https://gml.noaa.gov/grad/surfrad/aod/>). El AOD es un número adimensionado; un valor de 0,01 representa una atmósfera extremadamente limpia, mientras que el valor 0,4 representa un escenario similar a la neblina. Las figuras 3.3 y 3.4 muestran la evolución mensual de AOD en Uruguay en

los años 2015 y 2017, respectivamente. Estas imágenes fueron tomadas con el satélite MODIS TERRA & ACQUA (Lyapustin y Wang, 2022). Durante el 2015, el mes con mayores valores detectados de AOD fue agosto y los máximos se concentraron en el centro del país (en la figura están identificados con colores verde, amarillo y rojo). Durante los meses de enero, febrero, mayo, setiembre, octubre y diciembre, se observa una variabilidad espacial evidenciada por las tonalidades en azul y celeste/verdosa que representan regiones con diferentes valores de AOD. Durante los meses restantes los valores de AOD son notoriamente mas homogéneos sobre el territorio nacional. Por otro lado, durante el año 2017, el mes con mayores registros de AOD fue setiembre; además, los valores máximos se registraron en el norte del país. Los meses enero, febrero y diciembre mostraron heterogeneidad espacial en el campo de AOD pero los valores máximos fueron notoriamente inferiores a los registrados en setiembre. Por último, en los meses restantes se observó un campo de AOD muy homogéneo en todo el país.

En resumen, la diferencia observada en el AOD para los distintos meses del año revela una gran variabilidad estacional, mientras que la comparación entre los diferentes años indica una fuerte variabilidad interanual.

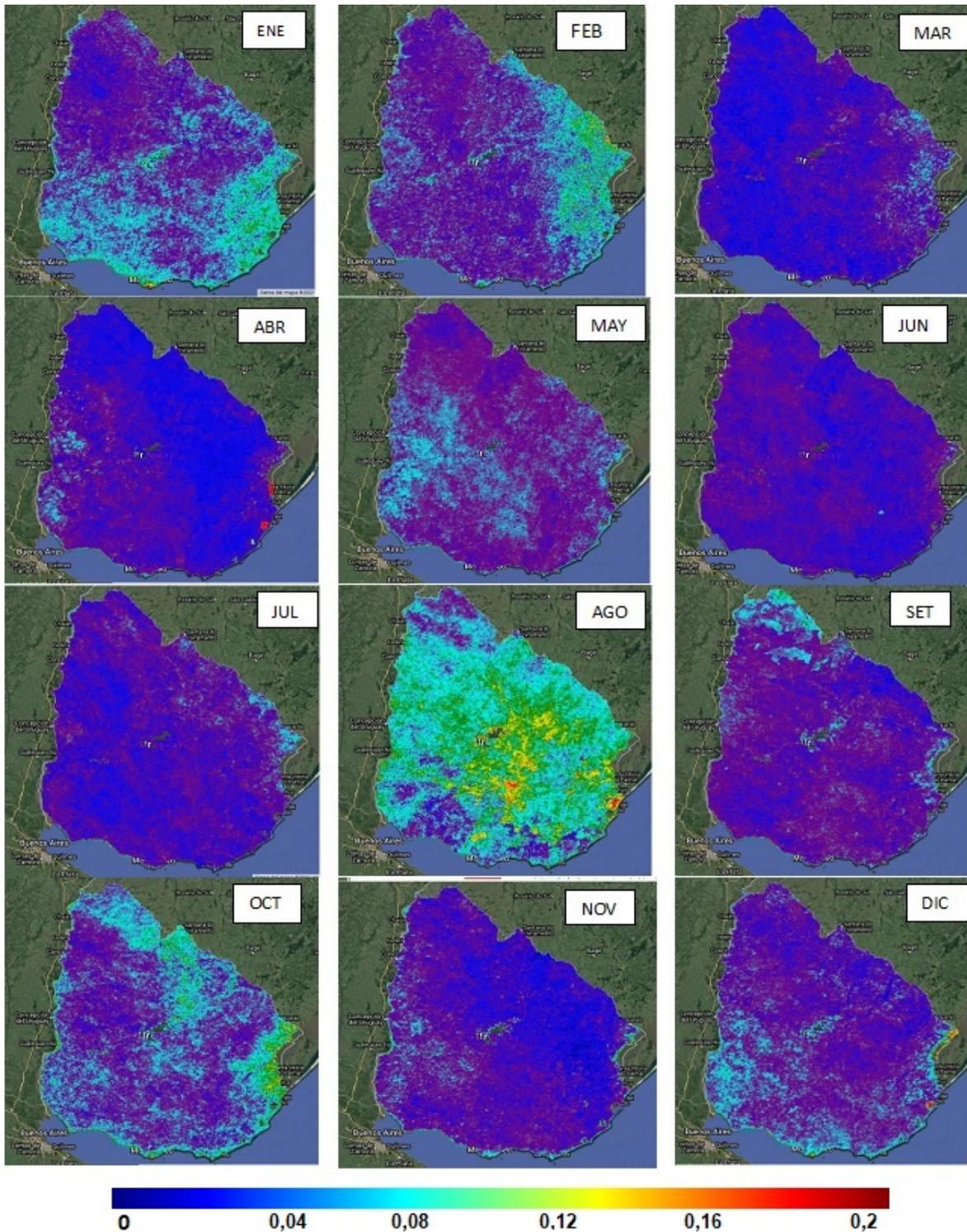
El material particulado es uno de los contaminantes que influye en los valores de AOD atmosférico. Debido a que la quema de biomasa es una fuente conocida de emisión de las partículas a la atmósfera, se buscó información sobre la cantidad de incendios activos detectados durante el año 2015 y 2017 para analizar su relación con los valores de AOD observados.

Los datos de focos de incendio activos fueron obtenidos del sitio web del programa de Monitoreo de incendios del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales de Brasil (INPE, por sus siglas en portugués, <https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas>). A partir de su base de datos se obtuvo información sobre la cantidad de focos de incendios detectados, discriminados por mes y año, en Uruguay, para el año 2015 y 2017. La tabla 3.1 presenta la información sobre estos resultados:

Año	Número de focos de incendios												Total Anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
2015	3	12	23	141	174	293	306	89	257	31	17	18	1364
2017	5	3	11	55	33	30	63	61	45	17	42	25	390

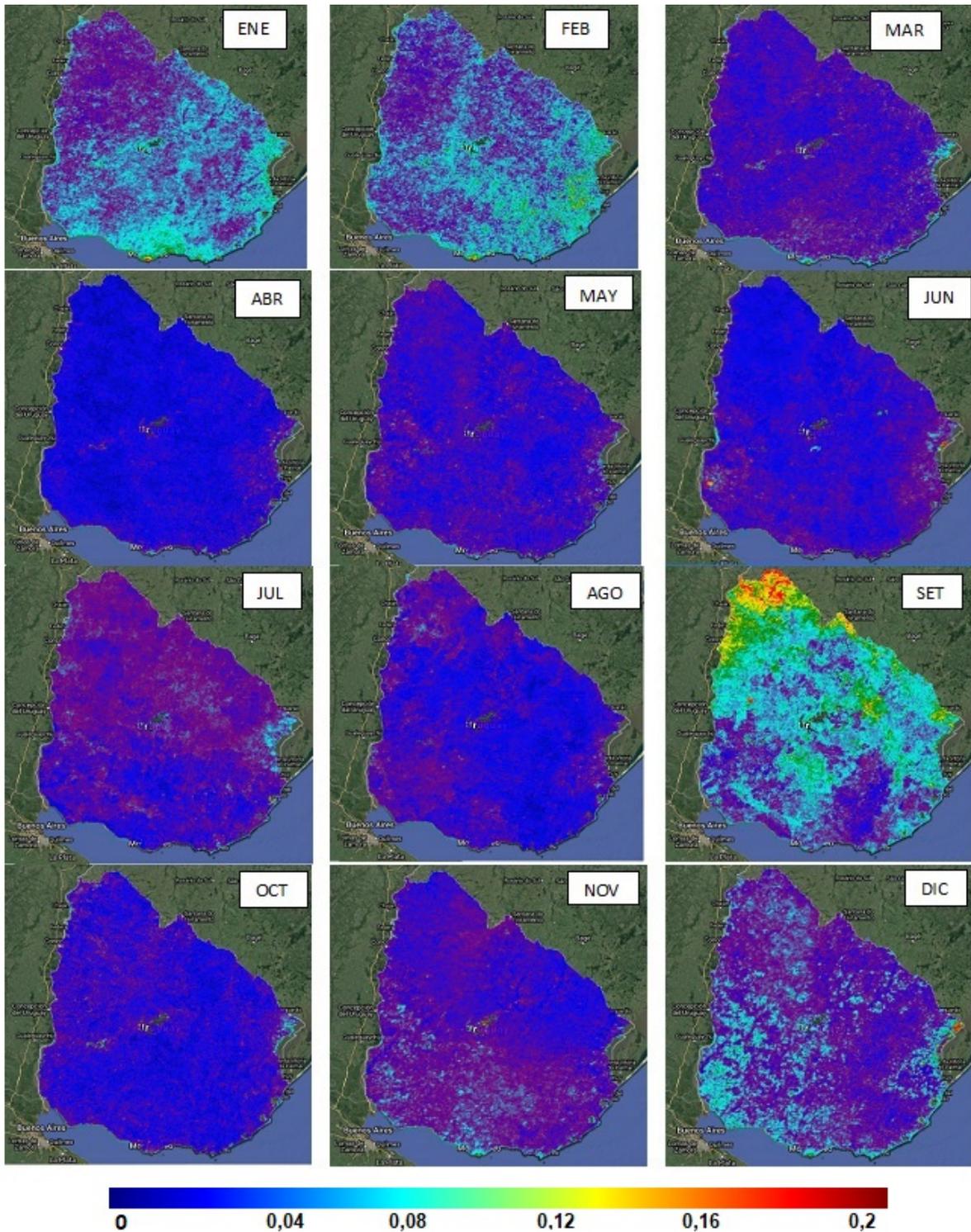
**Tabla 3.1:** Focos de incendios registrados por mes, durante el año 2015 y 2017, para el territorio de Uruguay. Fuente: <https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal>.

La cantidad de focos detectados en el mes de máximo AOD en el año 2015 (mes de agosto) fue 89. Los meses con mayor número de focos de incendios detectados fueron junio, julio y setiembre mientras que los valores de AOD para los respectivos meses fueron notoriamente bajos en comparación con el campo observado en agosto. Para



**Figura 3.3:** Distribución espacial del espesor óptico de aerosoles (AOD) sobre Uruguay, por mes, durante el año 2015. Fuente: MODIS TERRA & ACQUA

el año 2017, durante el mes con mayor AOD detectado (setiembre) se identificaron 45 focos de incendios activos, siendo julio y agosto los meses con mayor cantidad de focos de incendios activos detectados. Los campos de AOD para estos meses muestran valores muy bajos comparados con los observados en setiembre.



**Figura 3.4:** Distribución espacial del espesor óptico de aerosoles (AOD) sobre Uruguay, por mes, durante el año 2017. Fuente: MODIS TERRA & ACQUA

De lo anterior se desprende que la variabilidad espacio-temporal encontrada en el espesor óptico atmosférico sobre Uruguay no puede ser explicada solamente por fuentes locales y de un único tipo, sino que también puede existir influencia de distintas fuentes de aerosoles locales y, como se explicó en el marco teórico, regionales.

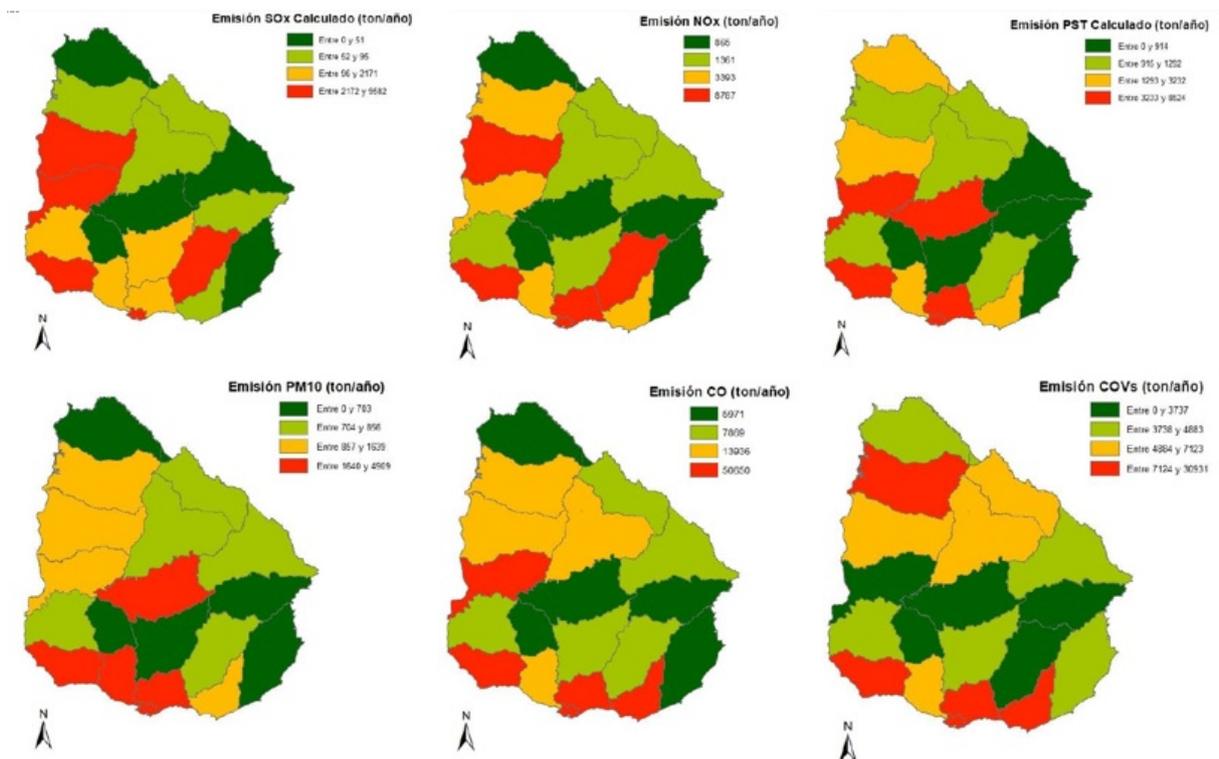
El inventario de Emisiones Atmosféricas para Uruguay (Cataldo et al. 2019), presenta estadísticas sobre los principales sectores emisores y las emisiones por departamento, calculadas al año 2015. Los sectores considerados para el análisis fueron: Vehicular, Agropecuario, Residencial, Servicios y Comercios e Industrial. La distribución porcentual entre los sectores de las emisiones calculadas, para los principales contaminantes (óxidos de azúfre  $SO_x$ , óxidos de nitrógeno  $NO_x$ , partículas suspendidas totales  $PST$ , partículas con diámetro aerodinámico menor a  $10 \mu m$   $MP_{10}$ , monóxido de carbono  $CO$  y compuestos orgánicos volátiles  $COV$ ), se detalla en la tabla 3.2.

CONTAMINANTE	Emisión calculada por sector (en %)				
	Vehicular	Agropecuario	Residencial	Serv. y Comercios	Industrial
$SO_x$	0	0	3	1	96
$NO_x$	60	9	3	1	27
$PST$	2	5	36	2	55
$MP_{10}$	4	8	60	3	25
$CO$	34	6	48	2	10
$COV$	9	10	76	4	1

**Tabla 3.2:** Distribución porcentual de emisión anual calculadas por sector, para Uruguay. Fuente: Inventario de emisiones atmosféricas 2015 (Cataldo et al. 2019).

Para cada contaminante se destaca un sector preponderante como fuente emisora: para el  $SO_x$  predomina el sector industrial con el 96 % de la emisión anual calculada, para el  $NO_x$  predomina el sector vehicular con un valor de emisión calculada anual del 60 %, en cuanto al  $PST$  predomina el sector industrial con el 55 % y para el  $CO$ ,  $COV$  y  $MP_{10}$  el principal sector emisor es el residencial con valores de 48 %, 76 % y 60 %, respectivamente. En cuanto a la distribución espacial de los valores de emisión por contaminante en Uruguay, la figura 3.5 muestra las toneladas anuales de emisión calculadas por departamento (Cataldo et al. 2019). Los valores anuales hallados se clasificaron en cuartiles y están representados por colores: verde oscuro representa una emisión anual menor al 25 % del máximo, verde claro entre el 25 y 50 %, el amarillo entre el 50 y 75 % y el naranja representa un valor mayor al 75 %. Los departamentos del sur son los que muestran mayores valores de emisión anual de todos los contaminantes analizados y le siguen en importancia los departamentos ubicados en el litoral oeste. Este resultado se debe principalmente a que en los departamentos de Montevideo y Canelones se concentra más del 50 % de la población del país (cifras estimadas en el censo llevado a cabo en el 2011, INE, 2011) y son los departamentos con más cantidad de industrias, por departamento (Cataldo et al. 2019).

Por lo tanto, la influencia de las emisiones originadas en el sector residencial, vehicular e industrial tiene una señal muy fuerte en la variabilidad temporal de los contaminantes atmosféricos en la región sur del país y podrían disimular el efecto de los procesos atmosféricos de escala sinóptica. Por esta razón, en esta tesis se seleccionó la región centro oeste como zona de estudio, en la cual son conocidas las emisiones de los distintos sectores y está alejada de las zonas más densamente pobladas del país.



**Figura 3.5:** Emisión anual de contaminantes por departamento (ton/año). Imágenes tomadas del Inventario de emisiones atmosféricas 2015 (Cataldo et al. 2019).

Particularmente en la ciudad de Fray Bentos, departamento de Río Negro, se encuentra emplazada una estación de monitoreo continuo de calidad de aire. Allí se registran datos de  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $MP_{10}$ ,  $PST$ ,  $CO$  y  $TRS$  (compuestos reducidos totales de azufre, por sus siglas en inglés) desde el año 2007 a la actualidad, en forma continua (toma mediciones cada un minuto), excepto para el  $PST$  que informa un valor diario.

En este trabajo no se tuvieron en cuenta los datos de  $SO_2$ ,  $TRS$  y  $PST$ . En cuanto al  $SO_2$ , vale la pena mencionar que los valores de concentración tuvieron una tendencia a la disminución notoria asociada al uso de combustibles sin contenido de azufre, por lo que prima la señal en el cambio de la fuente de emisión con respecto a la influencia de los fenómenos meteorológicos en este contaminante. Por otro lado, los datos de  $TRS$  tampoco se tuvieron en cuenta en este análisis debido a que este gas se asocia directamente a una fuente de emisión en particular que se encuentra muy cercana al sitio de emisión y no es el objetivo de este trabajo evaluar la influencia de las fuentes en forma individual. Por último, los datos de  $PST$  tampoco fueron incluidos en estos análisis ya que se cuenta con valores diarios de este contaminante por lo que no permitía el análisis a escala horaria, a diferencia de los parámetros restantes que sí permitió el análisis con promedios temporales horarios.

En cuanto a la legislación que regula los valores máximos de contaminantes atmosféricos permitidos en Uruguay, en el año 2021 entró en vigencia el Decreto 135/021

(Ambiente, 2021) que establece valores de calidad objetivo para contaminantes criterios y, entre ellos, para los parámetros estudiados en este trabajo, ver tabla 3.3. El documento establece estándares en promedio horario para el  $CO$  y para el  $NO_2$  y en promedio de 24 horas para el  $MP_{10}$ . Si bien en este trabajo se analiza el  $MP_{10}$  en promedio horario y se estudia el  $NO_x$  en vez de  $NO_2$ , la comparación de los resultados obtenidos en el análisis exploratorio con los valores fijados en el Decreto dan una idea de que tan importante es la carga de contaminantes atmosféricos en la región de estudio.

CONTAMINANTE	PROMEDIO TEMPORAL	VALOR OBJETIVO ( $\mu g.m^{-3}$ )	
		2023	2024
$NO_2$	Horario	200	200
$MP_{10}$	24 horas	75	50
$CO$	Horario	30000	30000

**Tabla 3.3:** Valores de calidad objetivo de concentración establecidos en el Decreto 135/021, vigentes hasta el 31/12/2023 y a partir del 01/01/2024 (Ambiente, 2021).

En resumen, en el Marco Teórico se presentó evidencia de la influencia de los procesos meteorológicos de gran escala y escala menor sobre la calidad del aire por lo que se plantea la hipótesis que en Uruguay también ocurre este tipo de interacciones. Por otro lado, hay evidencia documentada (Cataldo et al. 2019) de la existencia de fuentes emisoras de distintos tipos para Uruguay, las cuales están claramente cuantificadas por departamento y por contaminante.

Se seleccionó como zona de estudio la región centro-oeste del país, específicamente el departamento de Río Negro, debido a que presenta varias ventajas: altas tasas de emisión para los contaminantes estudiados en esta tesis y cuenta con un sitio de observación donde se generó una base de datos lo suficientemente larga y completa que permite obtener resultados robustos a partir de los análisis realizados.

### 3.1.1. Objetivos de la tesis

El objetivo general propuesto para esta tesis es estudiar la calidad de aire en la región centro-oeste de Uruguay, específicamente en la ciudad de Fray Bentos ubicada en el departamento de Río Negro, e identificar la influencia de la circulación de escala sinóptica de la región y del transporte regional de contaminantes sobre su variabilidad. Para alcanzar este objetivo general, se plantearon tres objetivos específicos:

- realizar un estudio exploratorio de la calidad del aire en la región de estudio, describiendo su estadística promedio y variabilidad.

Enfocando en la temporada de invierno:

- identificar eventos de contaminación típicos del lugar y realizar un análisis de casos de estudio, incluyendo la descripción de la situación sinóptica que los enmarca;
- estudiar la relación entre eventos de concentración alta de contaminantes y los patrones de circulación sinóptica que caracterizan la región.

# Capítulo 4

## Datos y métodos

En este capítulo se detallan las bases de datos utilizadas en el desarrollo de la tesis, junto con las metodologías aplicadas en las distintas etapas de análisis.

### 4.1. Datos

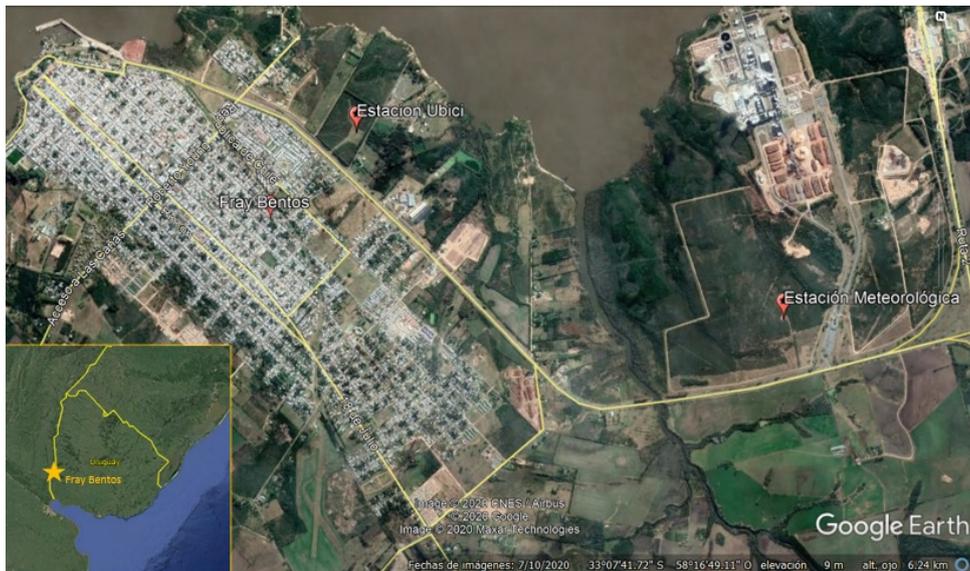
Para realizar los análisis se utilizaron distintos tipos de base de datos: observados (tanto meteorológicos como calidad de aire), datos de re-análisis, cartas sinópticas, imágenes satelitales, focos activos de incendios y datos de corridas de modelos numéricos atmosféricos.

#### 4.1.1. Datos de calidad de aire

Los datos de calidad de aire fueron proporcionados por la empresa UPM SA. La planta cuenta con una estación de monitoreo continuo de calidad de aire (estación Ubici), ubicada sobre la Ruta Nacional Vladimir Roslik Bichkov, en las afueras de la ciudad de Fray Bentos, en el departamento de Río Negro. La Figura 4.1 muestra la imagen satelital de la zona de estudio y la ubicación geográfica de la estación Ubici, cuyas coordenadas geográficas son: latitud sur  $33^{\circ}07'06''$  y longitud oeste  $58^{\circ}17'30,8''$ .

En la estación Ubici se registran concentraciones de  $CO$ ,  $NO_x$  y  $MP_{10}$  en forma continua con resolución temporal de un minuto. Los datos fueron subsecuentemente promediados en base de tiempo horaria para los análisis en esta tesis. El periodo de tiempo analizado fue entre el 1 de enero del 2008 a las 00:00 hasta el 31 de diciembre del 2018 a las 23:59 horas.

Los datos de concentración de  $CO$  fueron registrados con un equipo marca THERMO, modelo 48i (Thermo, 2005b), cuyo principio de detección se basa en que este gas tiene



**Figura 4.1:** Imágen satelital de la zona de estudio y ubicación geográfica de la estación de monitoreo de calidad de aire: estación Ubici. Fuente: Google Earth.

la capacidad de absorber radiación infrarroja, en una longitud de onda de  $4,6 \mu m$ . La muestra de aire que entra al equipo es excitada con radiación infrarroja y un detector capta la señal emitida por las partículas de  $CO$  presentes al volver al estado base. La concentración del gas presente en la muestra se calcula en función de la intensidad de la señal detectada por el receptor.

La concentración de  $NO_X$  fue obtenida con un equipo marca THERMO, modelo 42i (Thermo, 2005a). El valor informado por el equipo es el resultado de medir el  $NO$  y  $NO_2$  presentes en la muestra de aire y se obtiene el  $NO_X$  como la suma de ambos. El funcionamiento de este equipo se basa en el principio de que el  $NO$  reacciona con  $O_3$  y como producto de la reacción química se emite una radiación característica, con intensidad proporcional a la concentración de  $NO$ . Para determinar la concentración de  $NO_2$ , primero se convierte en  $NO$  y se mide con el mismo procedimiento, dando como resultado de la medición el valor de  $NO_X$ .

La concentración de  $MP_{10}$  fue medida con un equipo marca THERMO, modelo 5014i (Thermo, 2004). Este monitor usa el principio de la atenuación de radiación beta para determinar la concentración de partículas acumuladas en un determinado periodo de tiempo. Básicamente el sistema de muestreo es el siguiente: el equipo toma aire a un caudal constante a través de un cabezal que separa las partículas menores a  $10 \mu m$ . El flujo de aire que ingresa al equipo pasa a través de un filtro, donde se acumulan las partículas, durante un determinado periodo de tiempo. Luego de finalizado el periodo de toma de muestra, el filtro es irradiado con radiación beta, la cual es atenuada en forma proporcional a la masa de partículas acumuladas en el filtro. La concentración final se calcula en base a la masa de partículas estimada por la atenuación de la señal,

al caudal de entrada de aire al equipo y el tiempo de muestreo.

Los equipos mencionados realizan las determinaciones con metodologías de referencia validadas por organismos internacionales: UNE-EN, 2013 para la determinación de  $CO$ , AENOR, 2013 para  $NO_X$  y EPA, 2021a para  $MP_{10}$ . El uso de estos principios de medición presentan varias ventajas: bajos límites de detección, rangos extendidos de medición, ruido acotado en las señales eléctricas, fuerte estabilidad en las mediciones. En la Tabla 4.1 se muestran las características técnicas de los equipos utilizados para las determinaciones: límite de detección (LD), ruido en la señal y rango de medición, informados por el fabricante para los valores minutales de concentración hallados por los equipos.

	LD $\mu g.m^{-3}$	Ruido $\mu g.m^{-3}$	Rango $\mu g.m^{-3}$
$CO$	46,6	23,3	0 a $1,2 \times 10^7$
$NO_X$	0,8	0,4	0 a 30000
$MP_{10}$	3,0	-	0 a 5000

**Tabla 4.1:** Especificaciones técnicas de los equipos muestreadores de  $CO$ ,  $NO_X$ ,  $MP_{10}$  de la estación Ubici: Limite de detección (LD), Ruido de la señal eléctrica y Rango de medición.

#### 4.1.1.1. Control de calidad de los datos de concentración

Los datos proporcionados por la empresa ya sufrieron el proceso de control de calidad y depuración de datos anómalos resultado de fallas en el funcionamiento de los equipos muestreadores, mantenimiento correctivo y/o preventivo, etc. Además, estas series de datos son las presentadas a la autoridad ambiental nacional y fueron aprobadas por dicha institución, ya que forman parte del programa de monitoreo ambiental que la empresa que los genera debe cumplir.

De todas formas, algunos datos puntuales fueron descartados para estos análisis ya que se presentaron como outliers debido al objetivo general planteado en esta tesis: estudiar la relación entre la calidad del aire y fenómenos meteorológicos de diferentes escalas. Por lo tanto, los picos que puedan estar asociados a eventos puntuales de emisión de estos contaminantes no se tuvieron en cuenta para los análisis realizados en esta tesis. Los datos descartados fueron los siguientes:

- $CO$ : el 5 de agosto del 2012 desde las 5:00 a las 11:00 horas, donde se registraron valores horarios superiores a los  $6000 \mu g.m^{-3}$  y se alcanzó un valor horario de  $9022 \mu g.m^{-3}$  en el período mencionado.
- $NO_X$ : se descartó el valor de concentración del día 14 de febrero del 2013 a las 9:00 horas, cuando se alcanzó un valor de concentración de  $259,6 \mu g.m^{-3}$ , siendo los valores horarios previos y posteriores aproximados a los  $10 \mu g.m^{-3}$ .

- $MP_{10}$ : se descartaron los valores del día 4 de setiembre del 2013 a las 10:00 y 11:00 horas, que alcanzaron los 406,6 y 742,2  $\mu g.m^{-3}$ , respectivamente. Estos valores se separaron notoriamente de los datos horarios previos (10  $\mu g.m^{-3}$  aproximadamente) y posteriores (en el orden de los 100  $\mu g.m^{-3}$ ) a este pico.

Debido a que esta remoción fue de muy poca cantidad de datos (7 valores horarios de  $CO$ , 1 valor de  $NO_x$  y 2 de  $MP_{10}$ ) se puede asumir que la representatividad estadística de las series de datos no se ve afectada por este proceso.

Además, se puede observar en la serie histórica de datos de  $CO$  y  $NO_x$  cortes diarios a las 2:00 horas, correspondientes a chequeos que los mismos equipos muestreadores realizan como parte del mantenimiento preventivo. Estos chequeos se realizan en forma automática diariamente, con el objetivo de asegurar que los equipos miden en forma correcta concentraciones en rango alto y bajo.

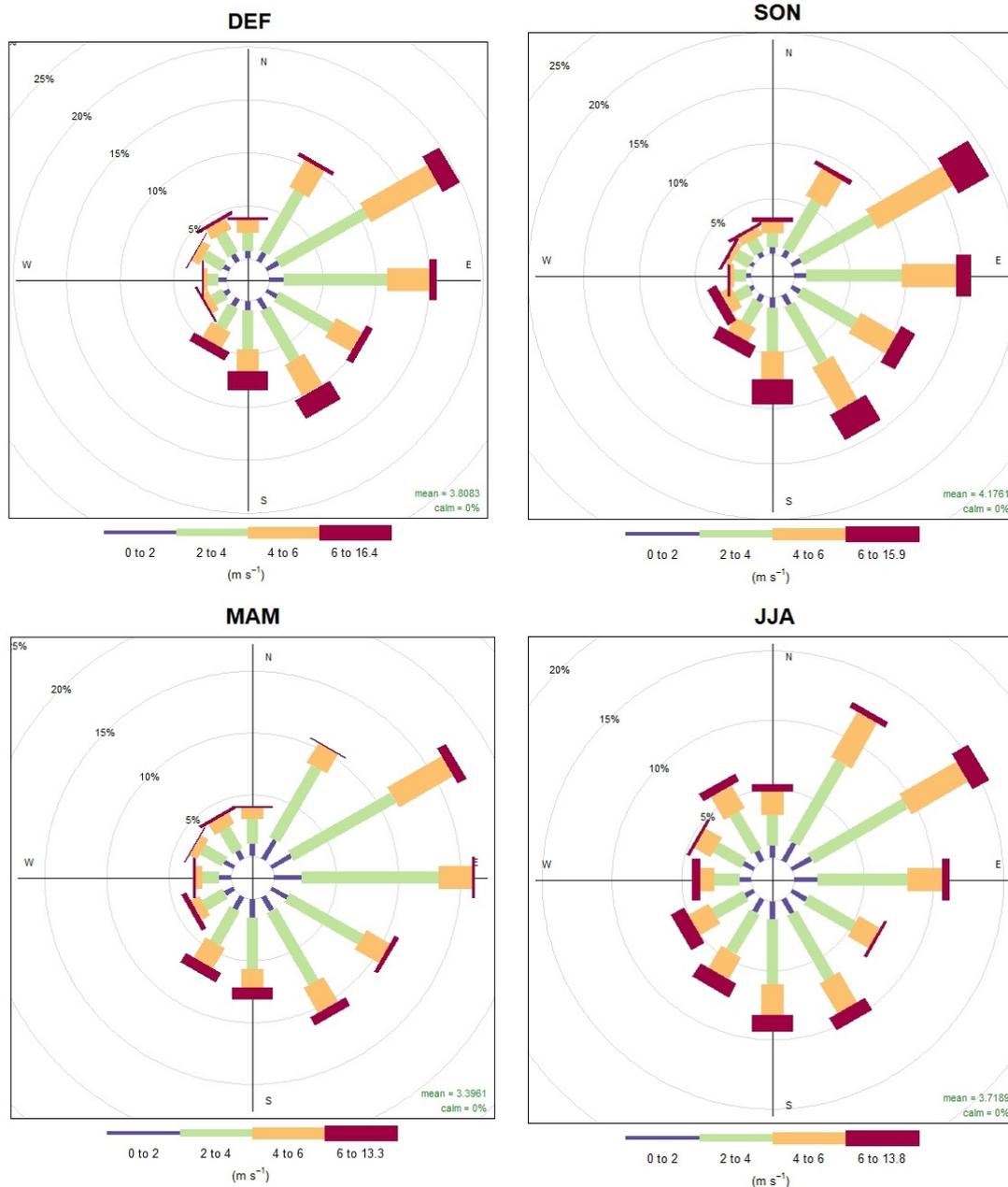
#### **4.1.2. Observaciones meteorológicas**

Los datos de dirección y velocidad de viento fueron registrados en una estación meteorológica automática, emplazada a una distancia de 3400 metros, en dirección sureste de la estación Ubici, ver Figura 4.1. Los sensores registran valores cada un minuto y con ellos se construyen los promedios horarios que se usaron en los análisis mostrados en el capítulo cinco. El periodo de tiempo que se analizó con esta base de datos abarca desde el 28 de setiembre del 2008 a las 00:00 hasta el 31 de diciembre del 2018 a las 24:00 horas. La marca y modelo de la estación es VAISALA, MAWS301 y el modelo del anemómetro instalado es el WAS425A, el cual es un sensor del tipo ultrasónico.

A partir de los datos observados se construyeron las rosas de viento para la zona de estudio por trimestre, ver Figura 4.2. En todos los trimestres se observa que la frecuencia de ocurrencias de los promedios horarios es predominante desde el cuadrante noreste y sureste, mientras que el cuadrante noroeste es que el muestra menor frecuencia de ocurrencias de viento proveniente de ese sector. Por último, se destaca que en JJA (trimestre de interés en los análisis mostrados en el capítulo seis) se observa un aumento en vientos del cuadrante suroeste y noroeste.

#### **4.1.3. Datos de reanálisis**

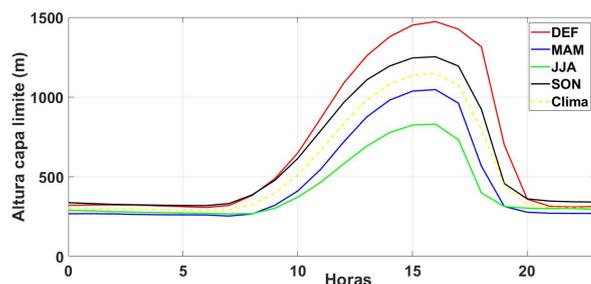
Los datos de altura de CLA en la zona de estudio fueron obtenidos del reanálisis ERA 5 (Hersbach et al. 2020). Este conjunto de datos presenta una resolución temporal horaria y están distribuidos en una grilla espacial de 0,25° de latitud por 0,25° de longitud. Para realizar los análisis posteriores se tomaron los datos del punto de grilla con coor-



**Figura 4.2:** Rosas de vientos construidas con promedios horarios de dirección y velocidad registradas en la zona de estudio. Periodo de estudio: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018.

denadas 33° de latitud sur y 58,25° de longitud oeste, en el periodo comprendido entre el 1 de enero del 2008 a las 00:00 horas hasta el 31 de diciembre del 2018 a las 23:00 horas. Con estos datos se construyó la marcha diaria estacional y anual, ver Figura 4.3, y se observó que presentan similitudes con los publicados por otros autores. Por ejemplo, se encontró que el ciclo diario es similar al que describen Liu y Liang (2010) y Allabakash y Lim (2020). En ambos artículos se describe que el máximo en la CLA ocurre a las 15 hrs (locales) y en el primer artículo mencionado se describe una caída abrupta de la CLA al atardecer mientras que el ascenso en horas de la mañana es mas

lento.



**Figura 4.3:** Marcha diaria de altura de la CLA en la región centro oeste del país, por trimestre y anual, construida a partir de datos horarios de reanálisis ERA-5. Período: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018.

En los datos de reanálisis usados en esta tesis se encontró que el máximo de la CLA ocurre a las 16 horas locales y la diferencia podría deberse a que se cuenta con datos horarios mientras que en los artículos mencionados en el párrafo previo se contaba con observaciones a las 15 horas. Además, los máximos de CLA por trimestre, ordenados de mayor a menor, se dan en el siguiente orden: en DEF se alcanza un máximo de 1473 metros, en SON 1252 metros, en MAM 1046 metros y en JJA el máximo obtenido es de 829 metros.

Estos valores presentan pequeñas diferencias con las reportadas en Gassmann y Mazzeo (2000). Los autores construyeron mapas de isolíneas de altura de CLA para Argentina y reportaron en las regiones más próximas al sitio de estudio de esta tesis valores promedio para cada estación: en DEF 1524 metros, en SON 1337 metros, en MAM 1121 metros y por último, en JJA 880 metros. Estos resultados dan a entender que los valores hallados para la zona de estudio a partir del reanálisis son muy realistas.

#### 4.1.4. Patrones de circulación sinópticos

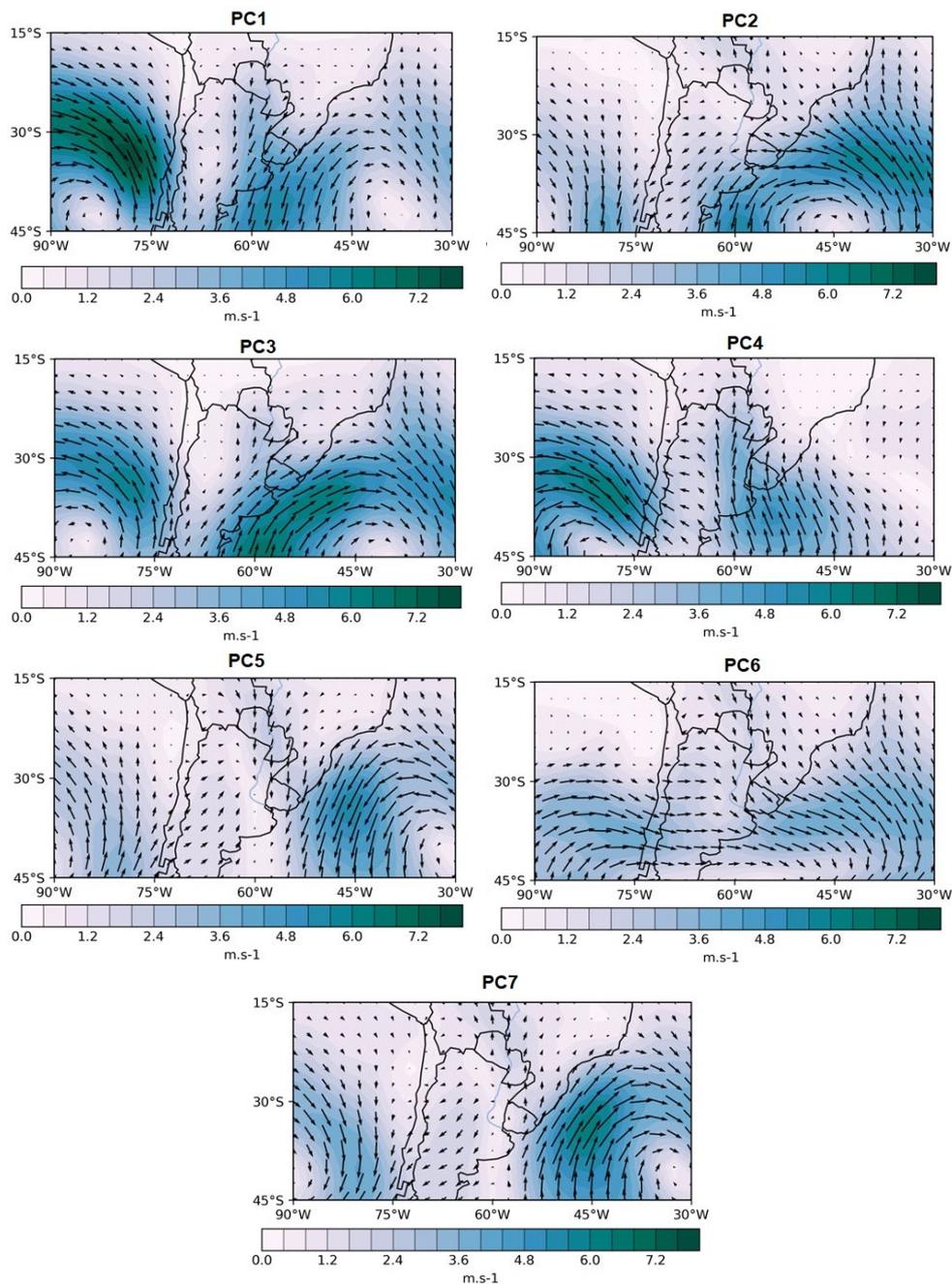
Para realizar el estudio de la relación entre circulación regional y calidad del aire (segunda etapa de análisis en esta tesis, capítulo seis) se usaron los resultados publicados en Arizmendi et al. (2022). Los autores identificaron patrones de circulación (PC) recurrentes para explicar la variabilidad de la circulación diaria en América del sur en los trimestres DEF, MAM, JJA y SON, a partir de un método de agrupamiento jerárquico del campo de presión a nivel del mar. La base de datos usada para la construcción de los PC fue tomada del reanálisis NCEP-CDAS1 (Kalnay et al. 1996) y se usó el método de K-means para agrupar los patrones, dando como resultado una base de datos diaria que incluye una lista con el PC identificado para cada día.

En esta tesis se usaron los resultados encontrados para el trimestre JJA, ya que la segunda etapa de este trabajo se enfocó en el análisis de la estación fría. En Arizmen-

di et al. (2022) se identificaron siete patrones de circulación típicos en la región para esta época, los cuales se muestran en la Figura 4.4. El PC1 representa la presencia de un anticiclón con su centro ubicado sobre el océano Atlántico, al este de Uruguay y otro ciclón ubicado sobre el océano Pacífico y cuyo centro alcanza la latitud  $45^{\circ}\text{S}$ , al oeste de Chile. Sobre la región del sitio de estudio se puede observar viento proveniente del sector noreste. En la figura del PC2 se identifica un anticiclón con centro ubicado en  $45^{\circ}$  de latitud sur y  $45^{\circ}$  de longitud oeste. Bajo esta configuración se puede observar la influencia de viento proveniente del sector este sobre la región de estudio. El PC3 representa la presencia de un ciclón sobre el océano Atlántico, centrado en las coordenadas  $45^{\circ}$  de latitud sur y  $45^{\circ}$  de longitud oeste. Además, también se observa un anticiclón sobre el océano Pacífico, el oeste de Chile con su centro ubicado a la altura de los  $45^{\circ}$  de latitud sur. En el sitio de estudio se observa la influencia de la rama occidental del sistema ciclónico, donde se observa viento proveniente del sector suroeste intenso. Bajo la influencia del PC4 se identifica viento proveniente del sector sur sobre la región de estudio. En el PC5 se puede observar la entrada de un frente por el litoral oeste de Uruguay por lo que sobre la zona de estudio se observa viento débil proveniente del sector norte. El PC6 parece estar caracterizado por una circulación ciclónica al sur de la latitud  $30^{\circ}\text{S}$  por lo que la zona de estudio se ve afectada por viento con dirección norte. Por último, bajo la configuración del PC7 se observa una región de viento débil que afecta el sitio de medición y un sistema anticiclónico intenso sobre el océano Atlántico. Es importante resaltar que los patrones de circulación mostrados representan los centroides de cada cluster, por lo tanto es el promedio de muchos días con circulación similar, lo cual debe ser tomado en consideración a la hora de interpretar la evolución sinóptica y su relación con la calidad del aire en la región de estudio.

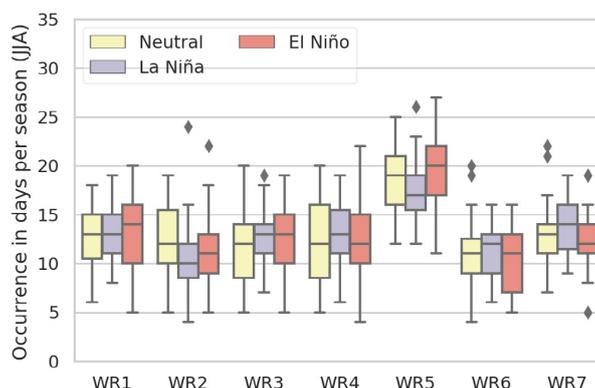
Los autores del trabajo mencionado también contaron los días de ocurrencia de cada PC en el trimestre estudiado y calcularon la frecuencia de ocurrencias (días/estación) para cada patrón, discriminados en años El Niño, La Niña y Neutro. De los resultados encontrados se destaca que el PC5 presenta mayor ocurrencia en JJA (la mediana de los tres boxplots supera el valor de 15 días/estación), mientras que para el resto de los PC, las medianas de los boxplot no supera el valor de 15 días/estación, ver Figura 4.5.

Para verificar la relación entre los patrones de escala sinóptica y los vientos locales, se construyeron rosas de viento usando los vientos medidos in situ para cada conjunto de días asociados a cada PC (Figura 4.6). La rosa correspondiente al PC1 muestra una componente predominante del sector noreste, lo cual es coherente con el mapa de circulación asociado. El viento proveniente de los cuadrantes restantes son débiles con respecto a lo observado en el cuadrante norte-este. La rosa asociada al PC2 indica viento predominante del sector este similar al patrón espacial asociado, aunque con



**Figura 4.4:** Patrones de circulación (PC) típicos identificados para América del Sur tomados de Arizmendi et al. 2022, para el trimestre JJA. Estos PC's se construyeron a partir del análisis de clusters, por el método de K-means, sobre el campo de presión de nivel del mar del reanálisis NCEP CDAS1.

mayor frecuencia del noreste. La rosa asociada al PC3 muestra una componente de viento predominante del cuadrante suroeste, que también es congruente con lo mostrado en el mapa de circulación de este PC. También se observa resultado congruente para la rosa asociada al PC4, la cual muestra componente de viento predominante del sur. El PC5 muestra vientos débiles provenientes del sector norte en la zona de estudio, mientras que la rosa de vientos muestra componentes predominantes del sector



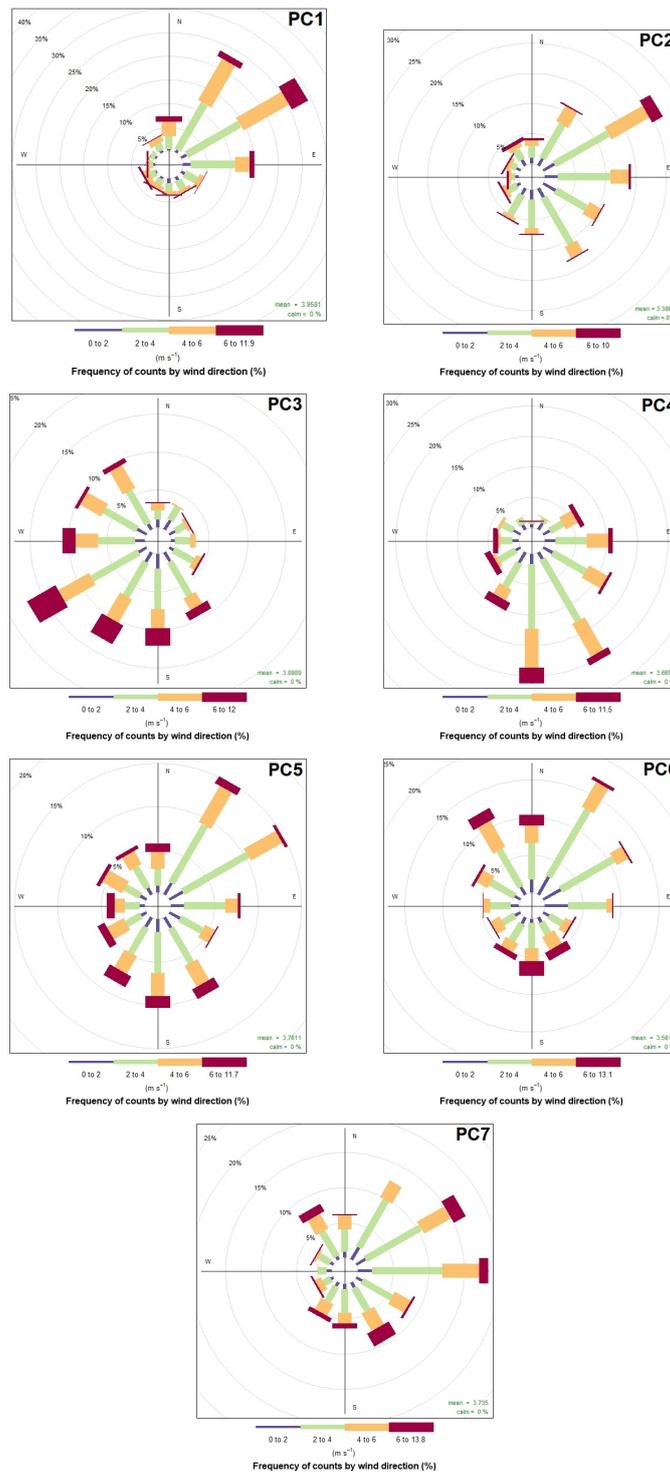
**Figura 4.5:** Boxplots de frecuencia de ocurrencias para cada PC (indicados como WR, por sus siglas en inglés), durante el trimestre JJA, discriminado según fases de ENSO. Figura tomada de Arizmendi et al. (2022).

noreste y sur, lo cual indicaría el pasaje del frente durante el día. La rosa asociada al PC6 también muestra registros de viento proveniente de todas las direcciones pero predominan en frecuencia el viento proveniente del norte, congruente con la circulación observada en el mapa. La rosa asociada al PC7 es la que muestra mayor diferencia a lo esperado según el mapa de circulación correspondiente, ya que muestra en la zona de estudio principalmente viento débil. Esta diferencia podría ser explicada por la variabilidad espacial de los patrones dentro del cluster. De todo lo anterior, se puede concluir que los patrones de circulación obtenidos en Arizmendi et al. (2022) representan adecuadamente la variabilidad de escala sinóptica en la zona de estudio.

#### 4.1.5. Modelo numérico atmosférico: HYSPLIT

Se utilizó el modelo numérico HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory, por sus siglas en inglés, Stein et al. 2015) desarrollado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Este es un modelo híbrido entre la metodología Lagrangiana y Euleriana para realizar los cálculos de trayectorias de parcelas, dispersión, transformaciones químicas y deposición de los contaminantes. Esta herramienta tiene un uso muy frecuente para el cálculo de las trayectorias "Backward", o sea, para trazar el camino que recorrió la parcela hasta llegar al sitio final, con el objetivo de identificar el origen de las parcelas de aire (<https://www.arl.noaa.gov/hysplit/>).

Este modelo se usó para identificar las trayectorias recorridas por las parcelas que arribaron al sitio de estudio, en el periodo entre el 27 y el 31 de julio del 2017. Este período fue seleccionado porque se identificó el desarrollo de un evento de contaminación en la zona de estudio (correspondiente a la segunda etapa de análisis) y a través del cálculo de las trayectorias se puede identificar el origen de los contaminantes detectados durante el episodio.



**Figura 4.6:** Rosas de viento construidas con registros de dirección y velocidad medidos en la estación meteorológica local, discriminados por PC típicos identificados para América del sur (Arizmendi et al. 2022), para el trimestre JJA.

Para cada día del periodo evaluado se estableció que las corridas numéricas iniciaran 72 horas previas a la hora 00 UTC y se trazaron tres trayectorias para cada día, que alcanzaron el sitio de observación con seis horas de diferencia: la línea de color rojo llega al sitio observado a la hora 00, la de color azul arriba seis horas antes y la de

color verde, doce horas antes de lo establecido.

Esta información se complementó con datos de focos de incendios activos en América del Sur (que se detalla en la siguiente sección) y con las cartas sinópticas que enmarcaron el desarrollo del evento.

#### **4.1.6. Focos de incendios activos**

Se descargó del sitio <https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/> el número de focos de incendio activos por día y su ubicación geográfica en América del Sur, durante el evento de contaminación estudiado que se desarrolló entre el 27 y el 31 de julio del 2017. Este sitio web pertenece al programa de Monitoreo de Quemadas del Instituto de Pesquisas Espaciales (INPE, por sus siglas en portugués). Las bases de datos disponibles para su descarga presentan información sobre la cantidad de focos activos de quemas de vegetación detectadas a partir de sensoramiento remoto. A través de un sistema de información geográfica se puede filtrar la información por región geográfica, por períodos, según el satélite usado para la detección y se puede descargar en formato csv, shapefile y kml. Para este trabajo, se descargó la base de datos obtenida con el sensor MODIS del satélite Acqua, el cual tiene una resolución espacial de 1  $km^2$ .

#### **4.1.7. Cartas sinópticas**

Las cartas sinópticas de superficie y 850 hPa se descargaron del sitio del Centro de Previsión del Tiempo y Estudios Climáticos (CPTEC, por sus siglas en portugués, <http://tempo.cptec.inpe.br/>). Los períodos analizados fueron desde el 21 al 25 de julio del 2014 y desde el 26 al 31 de julio del 2017, correspondientes a los dos eventos de contaminación estudiados en la segunda etapa de análisis de la tesis, por lo que se descargaron las cartas sinópticas de América del sur, en ambos niveles, a las 00 UTC de cada día de los períodos analizados.

### **4.2. Métodos aplicados**

En las siguientes subsecciones se describen las metodologías aplicadas y análisis realizados. Esta tesis se divide en dos etapas: en la primera, se realizó un análisis exploratorio de los parámetros indicadores de la calidad del aire durante el periodo entre el 1 de enero del 2008 al 31 de diciembre del 2018. La segunda etapa de análisis se concentró en el trimestre JJA, ya que es cuando se detectan los valores medios y P95 mas elevados de las series temporales estudiadas y se analizó cómo se comportan los contaminantes bajo la influencia de los PC característicos de América del sur durante

el invierno.

Los análisis realizados en la segunda etapa se diseñaron en base al comportamiento de los contaminantes observados durante dos eventos puntuales de contaminación seleccionados: uno de ellos asociado a fuentes locales de emisión y el otro evento asociado al transporte regional de contaminantes originados por la quema de biomasa. Para finalizar, se realizó un análisis exploratorio de las condiciones meteorológicas locales y los patrones de circulación sinópticos que enmarcan el desarrollo de eventos con estas características en forma generalizada.

En las siguientes secciones se describen en forma detallada las metodologías de análisis aplicadas en cada etapa.

#### **4.2.1. Caracterización de la calidad del aire**

La primera etapa consistió en realizar un análisis exploratorio de los parámetros indicadores de la calidad del aire para determinar como se comportan los contaminantes en diferentes escalas temporales. Para ello se calculó la climatología, la variabilidad interanual e inter-estacional y la marcha diaria por mes de cada parámetro estudiado. También se analizó el comportamiento de los contaminantes discriminados en días de la semana y fines de semana. En esta sección se siguió una metodología muy similar a la realizada en otros estudios, como en Targino y Krecl (2015), Rozante et al. (2017), Martins et al. (2018), Resquin et al. (2018), Targino et al. (2019). Además, se analizó la correlación entre la marcha diaria de cada contaminante atmosférico y la marcha diaria de la variable altura de la CLA para cada mes, con el objetivo de explicar la influencia de las condiciones meteorológicas locales sobre el comportamiento de los contaminantes, como en Mahalakshmi et al. (2011).

Por otro lado, se relacionaron los datos de dirección y velocidad de viento registrados in situ con los datos de concentración de contaminantes, a través de la construcción de los gráficos Polar Plot con el módulo OPENAIR del software de tratamiento de datos R (Carslaw y Ropkins, 2012), como se realizó en Resquin et al. (2018). Con estos gráficos se puede estimar la ubicación de la fuente de emisión del contaminante con respecto al sitio de observación. Cada dato de concentración se ubica en un cuadrante que representa la dirección de donde proviene el viento y la distancia radial del punto con respecto al centro de la figura se asocia a la velocidad del viento. El valor de concentración representado a través de la escala de colores, es el promedio de los datos de concentración que se ubican en el mismo cuadrante y con la misma distancia radial. Por lo tanto, valores altos de concentración registrados en forma simultánea a velocidades de viento bajas ( $< 3\text{m/s}$ ) indican que la fuente de emisión de ese contaminante se encuentra muy cerca del sitio de observación mientras que valores altos de

viento ( $> 6\text{m/s}$ ) indican que la fuente de emisión puede encontrarse mas alejada del sitio, según el criterio definido en Carslaw y Ropkins (2012).

Estas figuras se construyeron para cada contaminante, con los datos horarios agrupados por trimestres: DEF, MAM, JJA y SON. En vista de que los valores medios de concentración de los tres contaminantes analizados se detectan principalmente en la estación de invierno, los análisis posteriores se concentran en el trimestre JJA. Los resultados obtenidos en la primer etapa se muestran en el capítulo cinco.

#### **4.2.2. Relación entre patrones de circulación atmosféricos y calidad de aire**

Los análisis de la segunda etapa comenzaron con el estudio de dos eventos de contaminación diferentes que ocurrieron durante el trimestre JJA, seleccionados en base a las características del comportamiento de los valores de concentración. El primero de los eventos seleccionados se asoció a fuentes locales de emisión: se observó un pico de concentración en forma simultánea en  $CO$ ,  $NO_x$  y  $MP_{10}$ , al momento de detectarse un mínimo en el registro de velocidad del viento local, por lo cual se concluyó que no existía un factor que dispersión de los contaminantes emitidos localmente. El segundo evento se asoció al transporte regional de contaminantes, originados por la quema de biomasa en la región sur Brasil, noreste de Argentina y sur de Paraguay. En este caso, las series de datos mostraban un comportamiento diferente al del primer evento: no se observaron picos elevados de concentración pero los valores de  $CO$  y  $MP_{10}$  fueron aumentando paulatinamente en el correr de los días, por lo que el comportamiento de las series de datos fueron muy diferentes a los esperados según la marcha diaria y no se observó esta señal en la serie de datos del  $NO_x$ . Además, se observó que durante el desarrollo del evento el sitio de observación estuvo influenciado por viento proveniente del sector norte.

El evento asociado a fuentes locales de emisión se detectó el 24 de julio del 2014, por lo que se analizaron los datos horarios de los tres contaminantes evaluados desde el 15 al 26 de julio del 2014. Los valores de concentración se cruzaron con los datos de promedios horarios del viento observados localmente. A su vez, se descargaron las cartas sinópticas de superficie y 850 hPa desde el día 21 al 25 de julio del 2014, a las 00UTC, para determinar cuales fueron los fenómenos de escala sinóptica ocurridos en la región durante los días mencionados y establecer una correspondencia entre la circulación de escala regional y el viento y concentración de contaminantes a nivel local. Por último, se comparó la situación sinóptica de cada día (identificada a través de las cartas en superficie y en 850 hPa) con la clasificación en PC establecidas en Arizmendi et al. (2022) para realizar una correspondencia con los PC mas recurrentes

en la región.

Por otro lado, el evento asociado al transporte regional de contaminantes ocurrió entre el 26 de julio y el 1 de agosto del 2017. Al igual que en el primer evento, los valores de concentración se cruzaron con los promedios horarios de dirección y velocidad del viento observados in situ. También se descargaron las cartas sinópticas de superficie y 850 hPa para establecer qué fenómenos meteorológicos de escala sinóptica enmarcaron el evento estudiado. Para el período en que se desarrolló este evento se corrió el modelo HYSPLIT y se establecieron como condiciones para las corridas que el sitio de llegada de las parcelas fuera el lugar de observación de los contaminantes (estación Ubici) y que las trayectorias comenzaran en las 72 hrs previas a la hora de arribo. Se realizaron 5 corridas, la primera con fecha de arribo al sitio el 28 de julio del 2017 a las 00 UTC, las siguientes cada 24 hrs y la última alcanzó el sitio de observación el 1 de agosto del 2017 a las 00UTC. Para el periodo que abarca cada corrida se descargó la información de focos de incendios activos en América del sur y se contrastó con las trayectorias generadas con HYSPLIT para identificar posible transporte de contaminantes generados en los incendios hacia la zona de estudio. Para finalizar, nuevamente se comparó la situación sinóptica de cada día del evento con la clasificación en PC realizada por Arizmendi et al. (2022).

En función del comportamiento de los contaminantes durante los eventos estudiados se diseñaron dos tipos de análisis para caracterizar la relación entre patrones de circulación atmosférica y los eventos de contaminación encontrados. Las próximas secciones describen como se caracterizaron estos eventos y los análisis realizados.

#### **4.2.2.1. Relación entre patrones de circulación y calidad de aire: efecto de fuentes locales de contaminantes**

A partir del análisis del evento asociado a fuentes locales de emisión, se observó que las series de datos bajo la influencia de este tipo de eventos, muestran picos elevados de concentración que tienen pocas horas de duración. Por lo tanto, los análisis mostrados en esta etapa se realizaron sobre un subgrupo de datos conformado por los valores de P95 de concentración diaria, durante el trimestre JJA.

En primer lugar, se analizó la distribución de los contaminantes bajo la influencia de los PC sinópticos característicos de la región, como en el trabajo de Shu et al. (2020). Por lo tanto, los valores de P95 diario de concentración se agruparon según el PC característico correspondiente a cada día (base de datos obtenida a partir del trabajo de Arizmendi et al. 2022) y se construyeron los gráficos boxplot para cada grupo y para cada contaminante.

Luego, se seleccionó el 10 % de los valores más elevados del subgrupo de P95 de con-

centración diaria, de cada parámetro. A cada día seleccionado por este criterio se le llamó día de evento de contaminación. Estos valores se agruparon según el PC identificado el día en que se registró el dato y se calculó el porcentaje de ocurrencias de cada grupo. Además, se construyó un gráfico de dispersión con los valores de concentración por grupo y se calculó para cada PC la mediana del grupo y por contaminante.

El análisis previo no consideraba la ocurrencia del evento de contaminación en forma simultánea en los tres contaminantes. Por lo tanto, para finalizar, se buscaron aquellos días en los que se detectaron picos de concentración de los tres contaminantes en el mismo día. Los datos seleccionados se agruparon según el PC detectado y se calculó la media de concentración para cada PC.

#### **4.2.2.2. Relación entre patrones de circulación y calidad de aire: efecto del transporte regional de contaminantes**

Durante el evento asociado al transporte regional de contaminantes se observó que los valores de concentración mostraron un comportamiento diferente al evaluado en el evento previo: no se observó un pico puntual en los valores de concentración y tampoco se observó que la serie de datos cumpliera con el ciclo diario climatológico, donde el máximo del día se registra en la noche y el mínimo pasado el medio día. Además, este evento tuvo una duración de varios días. Estas características en la evolución de la concentración se observó principalmente en el  $MP_{10}$  y en forma menos acentuada en el  $CO$ .

Por lo tanto, para analizar los eventos asociados al transporte regional de contaminantes se buscaron episodios donde los valores mínimos diarios de concentración fueran mayores al P75 de la serie de mínimos diarios de concentración, durante al menos tres días consecutivos. Una vez detectados estos eventos se calculó la cantidad de ocurrencias por mes, duración en días y PC característicos durante el desarrollo de los eventos. Estos análisis se concentraron en la serie de  $CO$  y  $MP_{10}$  ya que se observó a partir de los análisis previos (gráficos de polarplot) que el  $NO_X$  no se ve influenciado por fuentes de emisión alejadas del sitio de observación. Además, se identificaron los PCs predominantes en cada uno de los tres días previos al día final del evento. Con este análisis se buscó encontrar transiciones (o permanencia) de PC que favorecieran los eventos de contaminación por transporte regional de contaminantes e identificar el origen de los mismos.

Para finalizar, se seleccionaron los períodos en los que coinciden episodios en la serie de  $CO$  y  $MP_{10}$  simultáneamente y se construyeron polarplots para los períodos coincidentes y para cada contaminante.

# Capítulo 5

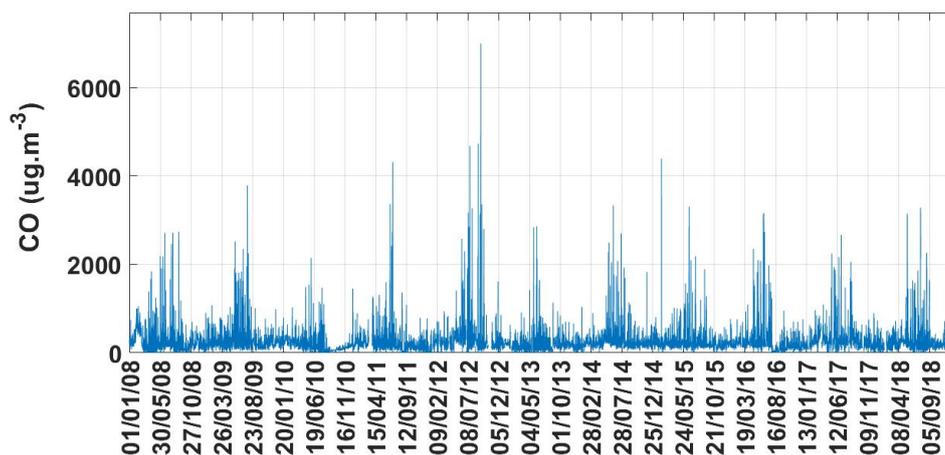
## Análisis exploratorio de los contaminantes

Para caracterizar la calidad del aire en la región de estudio se analizó el comportamiento de los contaminantes a escala anual, estacional, mensual, semanal y diaria. En la sección 5.1 se muestran los resultados obtenidos para el parámetro  $CO$ , en la sección 5.2 para el parámetro  $NO_x$  y por último, en la sección 5.3, los resultados obtenidos para el  $MP_{10}$ . Estos análisis se enfocaron en el período comprendido entre el 1 de enero del 2008 al 31 de diciembre del 2018.

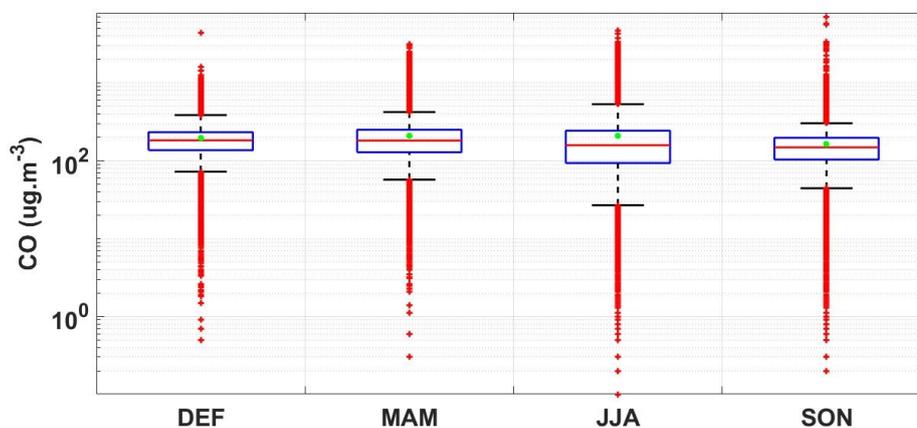
### 5.1. Caracterización del parámetro $CO$

La concentración de  $CO$  presenta una gran variabilidad interanual y fuerte estacionalidad, como muestra la Figura 5.1. El comportamiento de la serie temporal sugiere realizar el análisis a escala estacional y mensual, por lo que los valores horarios, agrupados en trimestres (DEF, MAM, JJA, SON), se muestran en la Figura 5.2.

La Figura 5.2 muestra que la dispersión de los valores es superior en el trimestre JJA, siendo el intervalo P95-P05 de  $507,4 \mu g.m^{-3}$ , mientras que el trimestre SON mostró la menor diferencia en el mismo intervalo, con un valor de  $259,5 \mu g.m^{-3}$ . Además, el grupo JJA es el que tiene la mayor diferencia entre la media y la mediana ( $52,6 \mu g.m^{-3}$ ), siendo el grupo con menor diferencia el trimestre SON (es de  $13,3 \mu g.m^{-3}$ ). Al comparar el valor P95 del trimestre JJA y el máximo valor registrado en la serie de datos con la legislación vigente para nuestro país (ver capítulo cuatro) se puede concluir que los valores de  $CO$  en la zona de estudio están alejados de generar un escenario crítico desde el punto de vista ambiental, tomando en cuenta los valores establecidos en el Decreto vigente como referencia: el valor máximo permitido es de  $30000 \mu g.m^{-3}$ , mientras que el P95 para JJA es de  $534,2 \mu g.m^{-3}$  y el valor horario



**Figura 5.1:** Serie temporal de valores horarios de  $CO$  en estación Ubici, para el periodo entre el 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018, expresados en  $\mu g.m^{-3}$ .



**Figura 5.2:** Boxplot de valores horarios de concentración de  $CO$  observados en estación Ubici, agrupados por trimestres: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM), Junio-Julio-Agosto (JJA), Setiembre-Octubre-Noviembre (SON), expresados en  $\mu g.m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Período evaluado: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018.

máximo registrado en el periodo 2008-2018, alcanzó el valor de  $6998 \mu g.m^{-3}$ . De todas formas, esto no significa que no puedan existir pico muy altos de concentración, sino que podrían ocurrir muy esporádicamente.

Los valores medios encontrados por grupos de trimestres son 198,5, 208,9, 211,1 y  $162,3 \mu g.m^{-3}$ , para DEF, MAM, JJA y SON, respectivamente. Estos resultados sugieren que el comportamiento de los datos en JJA se diferencia significativamente de los otros trimestres por lo que se aplica el test de Mann-Whitney-Wilcoxon para cuantificarlo. Los  $p\_valor$  obtenidos mostraron que hay una diferencia estadísticamente significativa entre los datos del trimestre JJA con los trimestres restantes (todos ellos  $< 0,01$ ,

ver Tabla 5.1 con los  $p\_valor$  obtenidos de aplicar el test estadístico). De la Tabla 5.1 también se destaca que el trimestre SON también tiene una diferencia estadísticamente significativa con los trimestres restantes y por otro lado, los datos del trimestre DEF y MAM no presentan diferencias estadísticamente significativa. Estos resultados concuerdan con las hipótesis que surgen de observar la Figura 5.2.

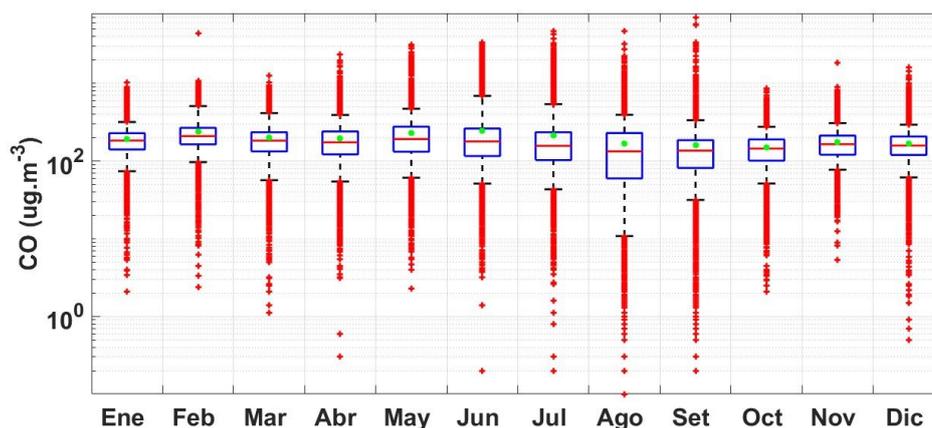
	DEF	MAM	JJA	SON
DEF	-	0,21	< 0,01	< 0,01
MAM	-	-	< 0,01	< 0,01
JJA	-	-	-	< 0,01
SON	-	-	-	-

**Tabla 5.1:**  $p\_valor$  obtenido de aplicar el test Mann-Whitney-Wilcoxon con los datos horarios de concentración de  $CO$ , agrupados en los trimestres DEF, MAM, JJA, SON, para la estación Ubici. Período analizado: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018.

Los valores horarios de concentración también se agruparon por mes y se construyeron los boxplot mensuales de la Figura 5.3. La dispersión de los grupos es muy variable de mes a mes; además, en junio se registra el valor medio mensual y percentil 95 mas alto:  $248,4 \mu g.m^{-3}$  el valor medio y  $692,8 \mu g.m^{-3}$  el valor P95; en los meses setiembre y octubre, se observan los valores medios mensuales mas bajos:  $159,7$  y  $151,4 \mu g.m^{-3}$ , respectivamente.

Uno de los factores que condiciona este comportamiento de carácter estacional, es que las bajas temperaturas registradas en latitudes medias durante el invierno limitan los movimientos verticales inducidos termodinámicamente. Este fenómeno impide el desarrollo vertical de la CLA, desfavoreciendo la dispersión de los contaminantes (Rozante et al. 2017, Mao et al. 2020, Mahalakshmi et al. 2011). Por lo tanto, la altura máxima que alcanza la CLA durante el día en los meses mas cálidos es mayor, facilitando la dispersión de los contaminantes presentes en la atmósfera. En los meses mas fríos ocurre el efecto inverso: la CLA alcanza alturas menores favoreciendo la concentración de contaminantes sobre la superficie terrestre. El efecto de la altura de la CLA en la concentración de contaminantes también se puede observar a partir del análisis del ciclo diario mensual.

La marcha diaria de concentración y altura de CLA por mes se muestran en la Figura 5.4. El análisis de los datos a escala diaria, discriminado por mes, muestra que los máximos diarios de concentración ocurren entre las 20:00 y las 22:00 horas y son más intensos en los meses mayo, junio y julio. Los paneles de la marcha diaria media mensual de concentración, representada por el gráfico de línea roja, muestran que el mínimo diario ocurre después del medio día. Este ciclo diario está bien definido en los meses de invierno, mientras que en los meses mas cálidos se muestra suavizado. Por

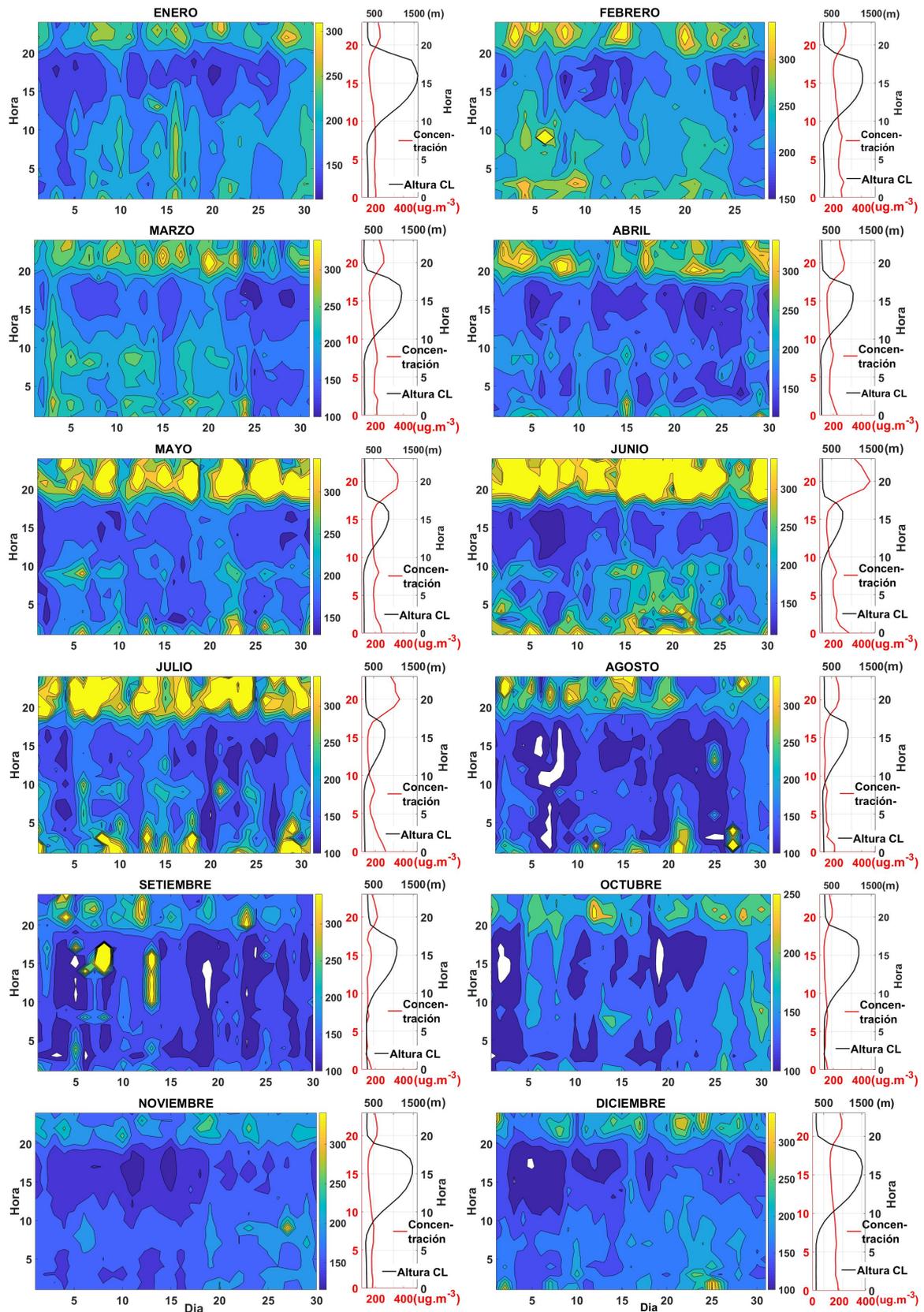


**Figura 5.3:** Boxplot de valores horarios de concentración de  $CO$  observados en estación Ubici, agrupados por mes, expresados en  $\mu g.m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Período evaluado: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018.

ejemplo, la diferencia entre el máximo y mínimo diario (en promedio) del mes de junio es de  $310,7 \mu g.m^{-3}$ , mientras que en enero es de  $80,3 \mu g.m^{-3}$ .

Durante los meses fríos otro factor que contribuye a intensificar el máximo de concentración de  $CO$  es el aporte de las emisiones del sector residencial, principalmente por calefacción. En el inventario de emisiones atmosféricas publicado para Uruguay (Cataldo et al. 2019) se destaca que el sector residencial es el que tiene un mayor aporte en las emisiones de  $CO$  en el país (48 % del total de las emisiones) y están asociadas fundamentalmente a la quema del combustible leña. En los meses de febrero a setiembre se puede distinguir un máximo relativo en horas de la mañana (aunque en los meses de agosto y setiembre el pico es notoriamente menor a los meses previos) lo cual se puede atribuir al aporte de las emisiones de tráfico vehicular, el cual representa el 34 % de las emisiones a nivel país según Cataldo et al. (2019).

En la Figura 5.4 también se presenta el ciclo diario de altura de CLA, representado por la línea negra. Se puede observar que el ciclo diario de concentración, por mes, tiene un comportamiento opuesto al del ciclo diario de altura de CLA: en horas del día, la altura de CLA aumenta, alcanzando el máximo diario alrededor de las 15 horas mientras que los valores de concentración de  $CO$  disminuyen hasta el alcanzar el mínimo diario, pasado el medio día; en horas de la tarde la altura de la CLA disminuye mientras que los valores de concentración comienzan a crecer. También se calculó la correlación entre los valores de ciclo diario de concentración y de altura de CLA. Se encontró que los valores de correlación son significativos y varían entre -0,43 (en el mes de mayo) y -0,87 (en el mes de enero), excepto para el mes de setiembre, cuyo valor de correlación resultó ser -0,05.



**Figura 5.4:** Evolución mensual y marcha diaria de valores horarios de concentración de  $CO$  observados en la estación Ubici, expresados en  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Periodo de estudio: 1 de enero del 2008 al 31 de diciembre del 2018.

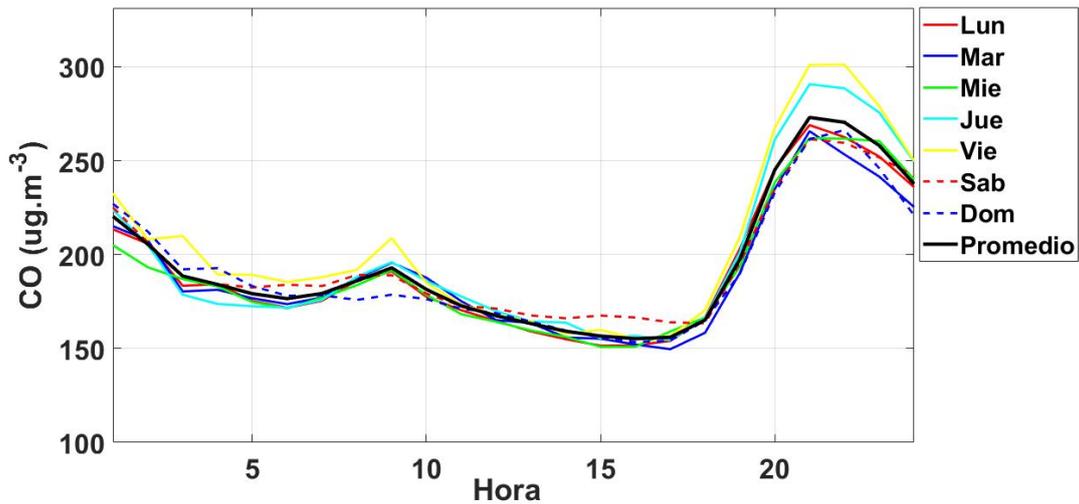
Estos resultados muestran similitudes con los publicados en Rozante et al. (2017). Los autores encontraron que el  $CO$  presenta una fuerte estacionalidad en la región metropolitana de San Pablo, con valores promedio mas altos en invierno y mas bajos en los meses de noviembre a febrero. A escala mensual, Rozante et al. (2017) indican que, en promedio, en el mes de junio y julio se registran los valores mas elevados de concentración. Este comportamiento lo atribuyeron a la dinámica del tráfico vehicular de la zona y a la influencia de factores meteorológicos locales como el efecto de la altura de la CLA.

También se analizó el comportamiento del ciclo diario de concentración, discriminado por días de la semana. La Figura 5.5 muestra la marcha diaria para cada día, donde es notoria que la diferencia entre las curvas es despreciable hasta las 20 horas. A partir de esa hora, los valores de concentración los días jueves (línea celeste) y viernes (línea amarilla), en promedio, superan los valores encontrados en los días restantes. Además, se observa una leve diferencia en la curva del día domingo en horas de la mañana, siendo menores, promedialmente, los valores encontrados con respecto a los restantes días de la semana. A partir de la Figura 5.6, que muestra el boxplot de los datos agrupados por días de la semana, no se observan diferencias significativas en la dispersión de los grupos: las diferencias entre ellos se observan principalmente en el P95 del día jueves y viernes (que son levemente superiores a los restantes días de la semana, ver línea negra) y en la distribución de los valores mínimos de cada día, representados por los puntos rojos. Sin embargo, el resultado de aplicar el test de Man-Whitney-Wilcoxon con un nivel de significancia del 5 %, muestra que los datos agrupados en los días viernes tienen una diferencia significativa con los días restantes de la semana y los días sábado con los días lunes, martes, miércoles y domingo (además del viernes), como se muestra en la Tabla 5.2.

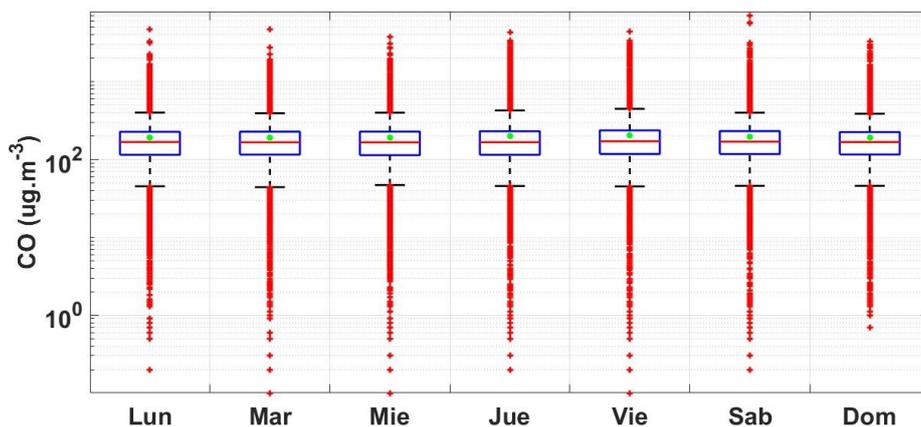
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Lunes	-	0,62	0,40	0,76	< 0,01	0,04	0,89
Martes	-	-	0,72	0,43	< 0,01	0,01	0,69
Miércoles	-	-	-	0,24	< 0,01	< 0,01	0,46
Jueves	-	-	-	-	< 0,01	0,07	0,70
Viernes	-	-	-	-	-	0,04	< 0,01
Sábado	-	-	-	-	-	-	0,03
Domingo	-	-	-	-	-	-	-

**Tabla 5.2:**  $p\_valor$  obtenido de aplicar el test Mann-Whitney-Wilcoxon para los datos horarios de concentración de  $CO$  agrupados por días de la semana, para la estación Ubici. Período de estudio: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018.

Estos resultados presentan diferencias con los publicados por Rozante et al. (2017), ya que los autores encontraron diferencias significativas entre los ciclos diarios de concentración del sábado y domingo con el resto de los días de la semana: los valores medios



**Figura 5.5:** Marcha diaria de concentración de  $CO$  de la estación Ubici, discriminados por día de la semana y expresados en  $\mu g.m^{-3}$ . Período de estudio: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018.



**Figura 5.6:** Boxplot de valores horarios de concentración de  $CO$  observados en estación Ubici, agrupados por días de la semana, expresados en  $\mu g.m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Período evaluado: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018.

de lunes a viernes son notoriamente mayores a los encontrados los sábados y domingos debido a la influencia del tráfico vehicular, que disminuye notoriamente los fines de semana. Por otro lado, en la estación Ubici, no se observan diferencias notorias entre los ciclos diarios medios, excepto en la marcha diaria del domingo donde no se observa el pico relativo entre las 8 y las 10 de la mañana. Este comportamiento de las curvas diarias da a entender que en la zona de estudio la influencia de la emisión proveniente del tráfico vehicular no es la más significativa sino que hay otras fuentes de emisión de  $CO$  y/u otros factores (como la meteorología local) que también son de relevancia.

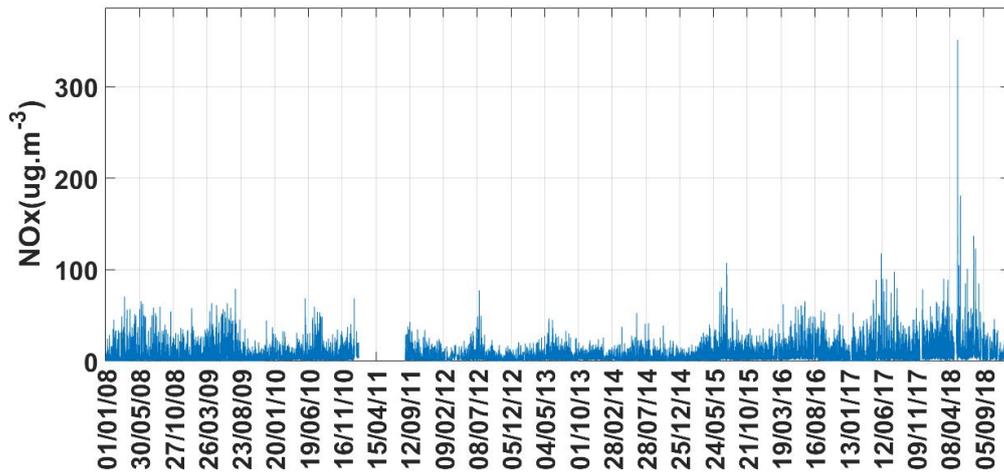
## 5.2. Caracterización de $NO_x$

Los análisis aplicados a la serie temporal de  $CO$  se replicaron en los datos horarios de  $NO_x$ . Este gas también presenta una variabilidad importante, como se puede apreciar en la figura 5.7. La serie también parece tener un ciclo estacional marcado, por lo que se analizó el comportamiento de los datos a escala estacional, agrupándolos por trimestres: DEF, MAM, JJA, SON.

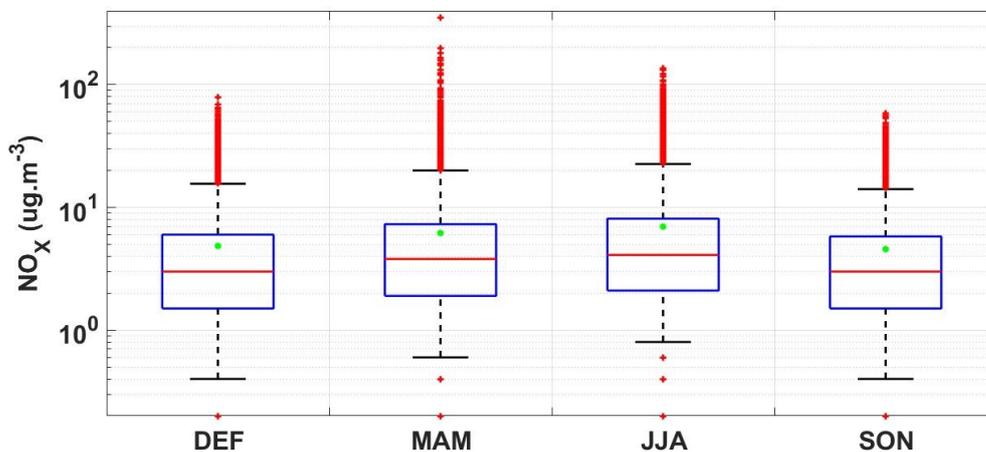
El boxplot de los datos agrupados en estaciones (figura 5.8) muestra que JJA es el trimestre con mayor dispersión en los valores (intervalo intercuartil: 6,0), promedio y P95 más alto (6,9 y 22,8  $\mu g.m^{-3}$ , respectivamente), mientras que el trimestre SON es el que presenta menor dispersión en el grupo (intervalo intercuartil: 4,3), valor promedio y P95 (4,6 y 14,1  $\mu g.m^{-3}$ , respectivamente). Nuevamente se comparó el P95 y el valor máximo de la serie de datos con el estándar establecido en el Decreto vigente para nuestro país como marco de referencia. Es importante resaltar nuevamente que el Decreto establece un límite para la concentración de  $NO_2$  en vez de  $NO_x$ , por lo que esta comparación da una idea de la carga de contaminante en la zona de estudio pero no es un resultado certero. El marco regulatorio establece un máximo de 200  $\mu g.m^{-3}$  para los promedios horarios de  $NO_2$ , mientras que el P95 de  $NO_x$  en el trimestre JJA es de 22,8  $\mu g.m^{-3}$  y el máximo de la serie temporal es de 351  $\mu g.m^{-3}$ . El valor P95 está muy alejado del máximo permitido pero eventualmente podrían ocurrir eventos que superen el valor permitido.

Si bien los valores agrupados por trimestres muestran diferencias en la dispersión y en los valores medios y medianas entre grupos se aplicó el test de Mann-Whitney-Wilcoxon para identificar diferencias estadísticamente significativas. Los resultados obtenidos de los  $p\_valor$  fueron menores a 0,01, indicando que existen diferencias significativas entre las diferentes temporadas del año.

Para este gas también se realizó el análisis a escala mensual. En primer lugar, se agruparon los valores por mes y se construyó el boxplot mostrado en la Figura 5.9. Se puede observar claramente un ciclo anual, donde los valores medios, medianas y P95 hallados son mayores en los meses fríos y disminuyen en los meses cálidos. Por ejemplo, los valores medios mensuales más altos se hallaron en los meses desde mayo a agosto (5,2, 5,8, 6,1 y 5,1  $\mu g.m^{-3}$ , respectivamente) y los más bajos desde octubre a febrero (3,6, 3,6, 4,1, 3,7 y 4,0  $\mu g.m^{-3}$ , respectivamente). Los valores de P95 de cada mes también fueron más elevados en el período mencionado (18,0, 18,6, 19,4 y 16,3  $\mu g.m^{-3}$ , para los meses de mayo a agosto) y en los meses entre octubre y febrero el P95 fue menor (11,1, 11,7, 13,2 12,0 y 13,4  $\mu g.m^{-3}$ , respectivamente). Esta característica en el comportamiento de la concentración del contaminante coincide con los resultados reportados por Rojas et al. (2020), donde asocian una mayor ocurrencia



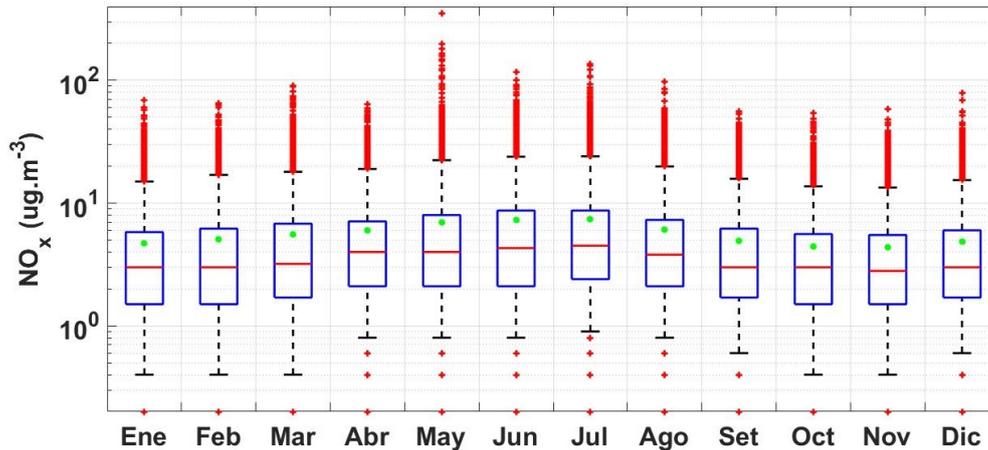
**Figura 5.7:** Serie temporal de  $NO_x$  en estación Ubici: valores horarios desde el 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018, expresados en  $\mu g.m^{-3}$



**Figura 5.8:** Valores horarios de  $NO_x$  agrupados por estaciones: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM), Junio-Julio-Agosto (JJA), Setiembre-Octubre-Noviembre (SON), expresados en  $\mu g.m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Período de estudio: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018.

de valores medios diarios mas altos con temperaturas medias bajas debido a la poca capacidad de dispersión de los contaminantes durante los meses más fríos. Además, a diferencia de lo observado en el  $CO$ , este ciclo anual está claramente definido.

El análisis del ciclo diario de concentración discriminado por mes (Figura 5.10), muestra una evolución a lo largo del año. En los meses fríos el ciclo está bien definido por dos máximos diarios: el mayor ocurre entre las 19 y las 21 horas y el segundo en importancia, entre las 8 y 9 horas; además, el mínimo del día en promedio ocurre pasado el medio día. Por ejemplo: en junio (el mes que presenta el mayor valor medio y P95), el valor máximo promedio del día ocurre a las 19 horas y es de  $12,9 \mu g.m^{-3}$



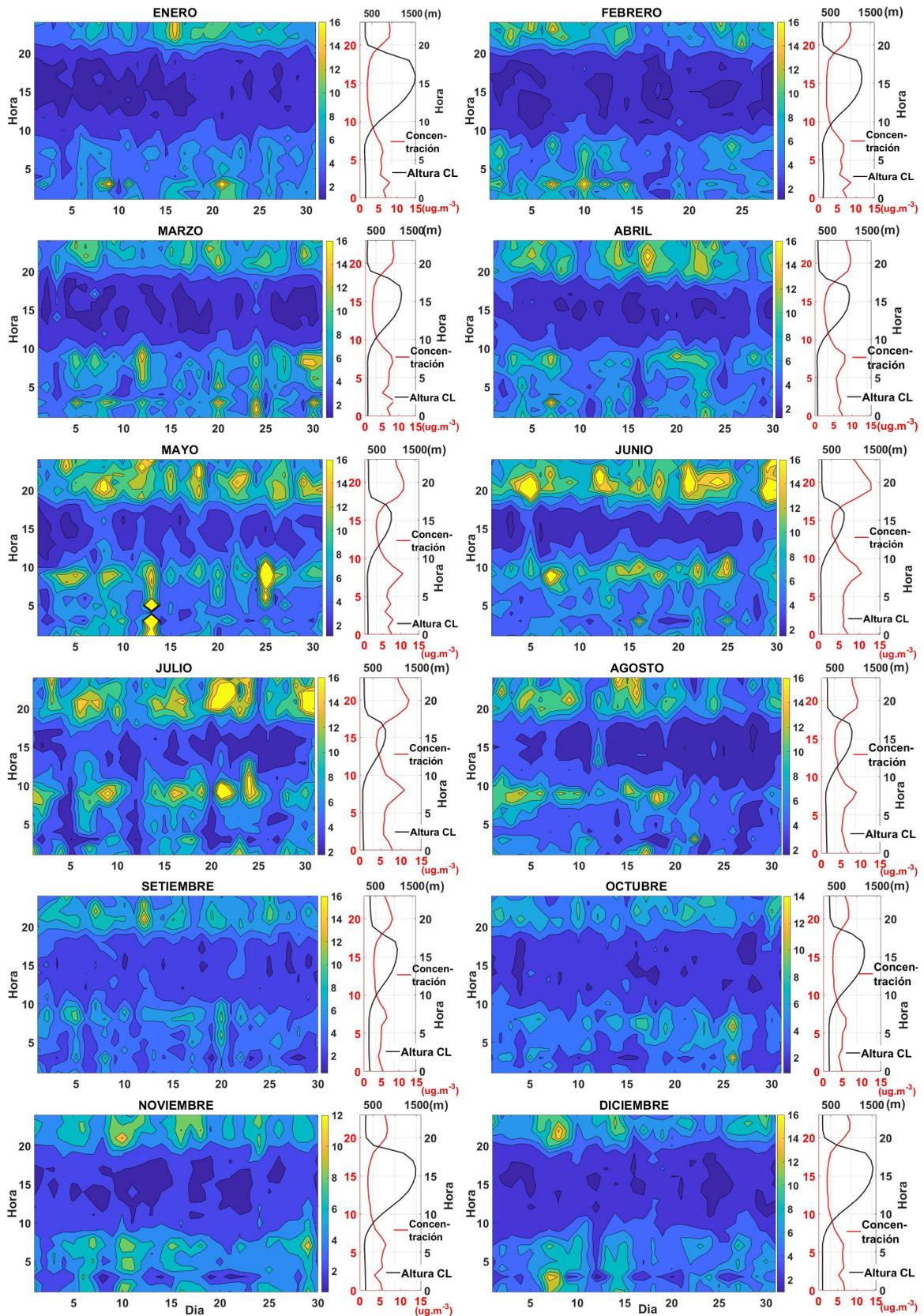
**Figura 5.9:** Boxplot de valores horarios de concentración de  $NO_x$  observados en estación Ubici, agrupados por meses, expresados en  $\mu g.m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Período evaluado: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018.

y el máximo secundario ocurre a las 8 horas y alcanza un promedio de  $10,5 \mu g.m^{-3}$  mientras que el mínimo diario es  $3,2 \mu g.m^{-3}$  y se observa a las 14 horas.

Por otro lado, en los meses cálidos, el ciclo diario es mucho más débil; en promedio, el máximo secundario que ocurre en la mañana es más bajo que el valor alcanzado en la noche e inclusive, en algunos meses no se puede distinguir (desde noviembre a febrero). Además, la diferencia entre el máximo y mínimo diario es mucho menor que en los meses fríos, principalmente porque el máximo diario es en promedio más bajo que en los meses fríos. Por ejemplo, en diciembre el valor promedio máximo del día se alcanza a las 22 horas con un valor de  $8,2 \mu g.m^{-3}$  y el valor mínimo en promedio es  $2,3 \mu g.m^{-3}$  y ocurre a las 14 horas.

En la Figura 5.10 también se presenta el ciclo diario de altura de CLA, representado por la línea de color negro. En las horas siguientes al medio día, se detectan los valores máximos de altura de CLA y los valores mínimos diarios de concentración de  $NO_x$ , mientras que ocurre lo contrario en horas de la noche. En la mañana esta relación no es clara ya que el pico matutino de concentración observado varía fuertemente en el transcurso del año, o sea, está bien marcado en los meses de abril a setiembre y se suaviza en los meses restantes. Se calculó la correlación entre los ciclos diarios de concentración de  $NO_x$  y altura de CLA para cada mes y se encontraron valores que varían entre -0,62 en el mes de julio y -0,89 en el mes de marzo.

De todas formas, es importante destacar que los valores estadísticos reportados sobre la climatología a escala estacional y mensual son muy bajos comparados con los estándares de calidad ambiental propuestos por la OMS (World Health Organization,

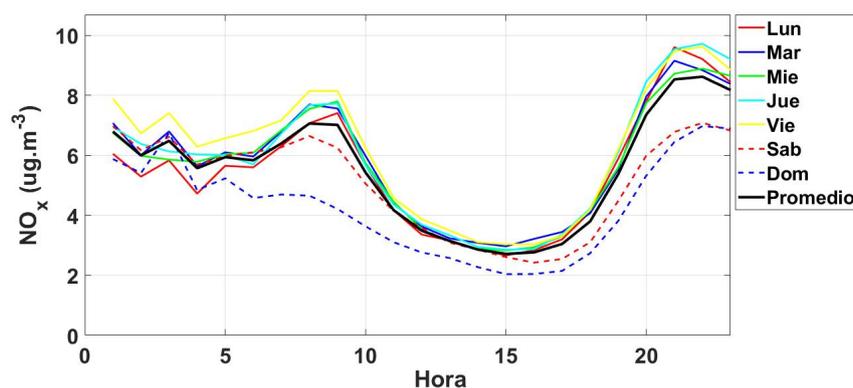


**Figura 5.10:** Evolución mensual y marcha diaria de valores horarios de  $NO_x$  en la estación Ubici, expresados en  $\mu g.m^{-3}$ . Periodo de estudio: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018.

2006) y por la legislación nacional vigente al 2022 (Ambiente, 2021), que establecen el valor de  $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  como valor límite para el promedio horario de  $\text{NO}_2$  (recordar que el  $\text{NO}_x$  es la suma del  $\text{NO}$  y el  $\text{NO}_2$  presentes). Durante el periodo estudiado se superó el valor de  $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  en una oportunidad: el día 13 de mayo del 2018 a la hora 4:00 (hora local), cuando se registró un valor de  $351 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (ver Figura 5.7).

Además, los valores medios mensuales reportados en esta tesis para este parámetro son inferiores a los encontrados en tres sitios de medición de la ciudad de Buenos Aires, según lo publicado en Rojas et al. (2020): el valor medio mensual más elevado en la estación Ubici se encuentra en el orden de los  $6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , mientras que en la ciudad de Buenos Aires se reportaron valores medios en el rango entre  $16$  y  $23 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (Rojas et al. 2020), promediando valores de periodos temporales similares.

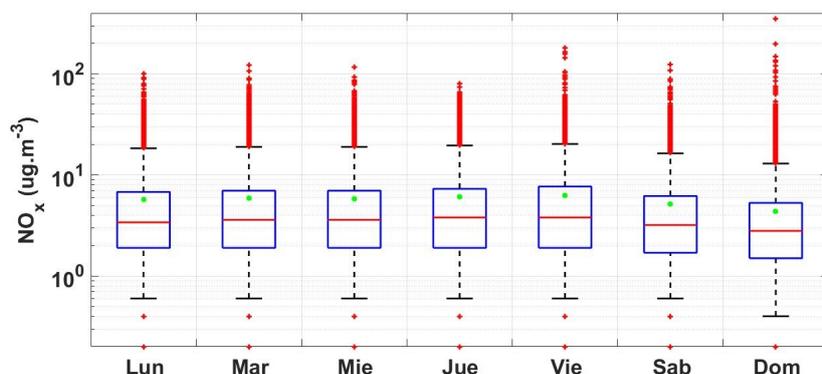
En cuanto al comportamiento de los datos horarios discriminados por días de la semana (ver figura 5.11), la marcha diaria del día domingo (línea punteada de color azul) se diferencia claramente de las otras curvas, entre la hora 5:00 y el final del día, mostrando valores promedio de concentración mas bajos que en los días restantes. La diferencia entre las curvas que representan la marcha diaria de los días entre semana es imperceptible. Esta diferencia puede ser explicada por la influencia de la fuente principal de emisión de este gas que es el tráfico vehicular (Cataldo et al. 2019), ya que los días domingos baja su frecuencia con respecto a los días de semana. De todas formas, es importante resaltar que los valores máximos promedios encontrados para los días de la semana no superan los  $10,0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , por lo que da a entender que los valores medios no reflejan escenarios críticos desde el punto de vista ambiental, como se mencionó en el párrafo anterior.



**Figura 5.11:** Marcha diaria de  $\text{NO}_x$  en estación Ubici, discriminados por día de la semana, expresados en  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Período de estudio: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018.

Por otro lado, se muestran los valores horarios agrupados en boxplot, por día de la semana, ver figura 5.12. En esta figura nuevamente se destaca que el grupo del día domingo es el que tiene menor valor promedio, menor valor de mediana y el P95 y P05

más bajo, comparados con los días restantes. Se aplicó un test no paramétrico para comprobar objetivamente que los datos de los distintos grupos provienen de la misma muestra. Los resultados de aplicar el test de Mann-Whitney-Wilcoxon mostraron que hay diferencias estadísticamente significativas entre los grupos excepto entre el día martes y miércoles ( $p\_valor = 0,49$ ) y entre el día jueves y viernes ( $p\_valor = 0,44$ , ver Tabla Tabla 5.3).



**Figura 5.12:** Boxplot de valores horarios de  $NO_x$  en estación Ubici, agrupados por día de la semana, expresados en  $\mu g.m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Período de estudio: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Lunes	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Martes	-	-	0,49	< 0,01	0,03	< 0,01	< 0,01
Miércoles	-	-	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Jueves	-	-	-	-	0,44	< 0,01	< 0,01
Viernes	-	-	-	-	-	< 0,01	< 0,01
Sábado	-	-	-	-	-	-	< 0,01
Domingo	-	-	-	-	-	-	-

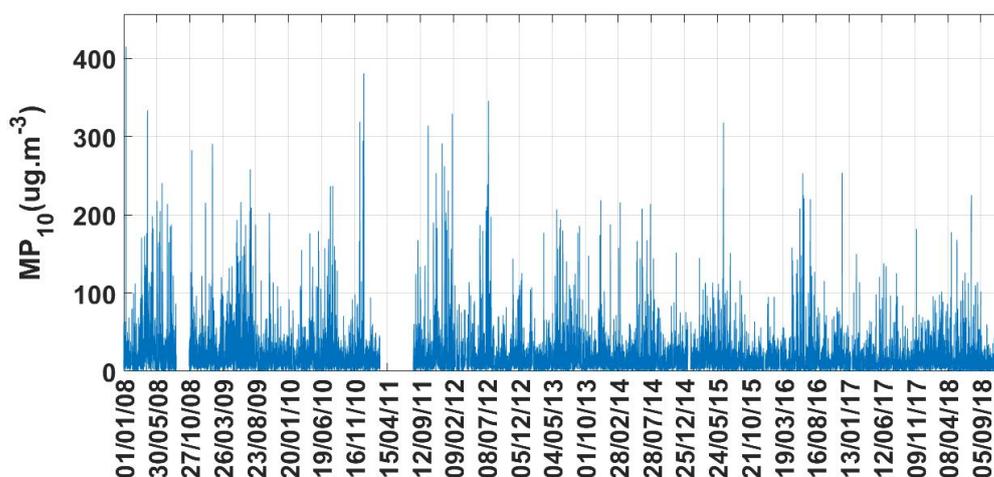
**Tabla 5.3:**  $p\_valor$  obtenido de aplicar el test Mann-Whitney-Wilcoxon para los datos horarios de concentración de  $NO_x$  agrupados por días de la semana, para la estación Ubici. Período de estudio: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018.

### 5.3. Caracterización de $MP_{10}$

La evolución temporal de los valores horarios de  $MP_{10}$  se muestra en la Figura 5.13. Se observa alta variabilidad en el comportamiento de la serie pero no parece tener una estacionalidad tan marcada como los parámetros  $CO$  y  $NO_x$ . Estos datos, agrupados en trimestres (DEF, MAM, JJA, SON), se muestran en los boxplots de la Figura 5.14. También se aplicó el test de Mann-Whitney-Wilcoxon a los datos agrupados por

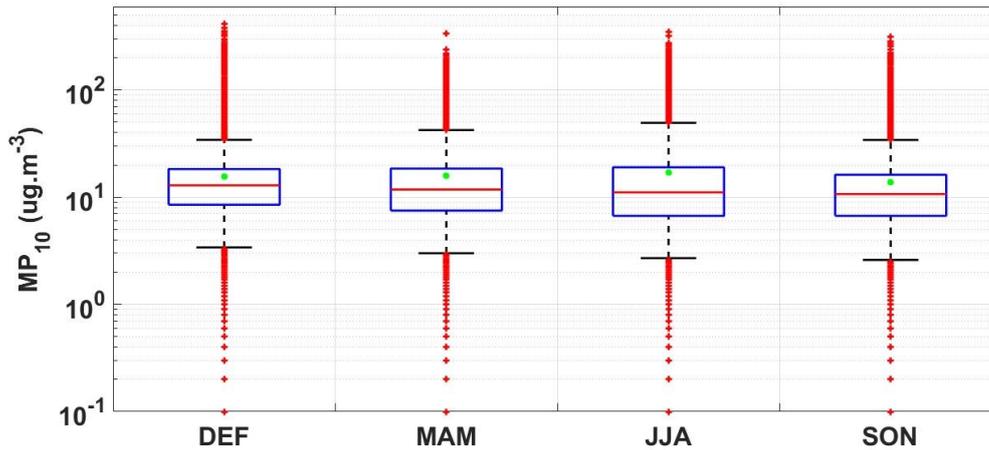
trimestre y los resultados revelaron que la diferencia entre los grupos es estadísticamente significativa: en todos los casos el  $p\_valor$  resultó menor a 0,01. Además, al igual que para el  $CO$  y  $NO_x$ , el P95 y valor medio del trimestre JJA es mayor que para los trimestres restantes. El valor del P95 es  $49,4 \mu g.m^{-3}$  para JJA y le siguen en orden decreciente 42,3, 34,3 y  $34,2 \mu g.m^{-3}$  para los trimestres MAM, DEF y SON, respectivamente. En cuanto a los valores medios, el mayor es  $17,0 \mu g.m^{-3}$  y le siguen 15,9, 15,6 y  $13,9 \mu g.m^{-3}$  para los trimestres JJA, MAM, DEF y SON, respectivamente. Para este contaminante no es posible realizar una comparación con el marco normativo vigente como referencia ya que el Decreto establece límites para valores en promedio diario de concentración y la serie de datos que se analiza en este capítulo está en base temporal horaria.

Por otro lado, se destaca que el trimestre JJA tiene el mayor intervalo P05-P95 pero presenta un valor de mediana menor que la mediana hallada en el trimestre DEF (11,1 y  $12,9 \mu g.m^{-3}$ , para JJA y DEF, respectivamente). Este resultado puede ser atribuido a la distribución de los valores extremos que presenta el trimestre JJA: el P05 es más bajo en JJA que en DEF y el P95 es más alto en JJA que en DEF pero la cola de la distribución no es lo suficientemente pesada como para mover el valor de la mediana.



**Figura 5.13:** Serie temporal de  $MP_{10}$  en estación Ubici: valores horarios desde el 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018, expresados en  $\mu g.m^{-3}$

En la figura 5.15 se muestra la marcha diaria de cada mes. El patrón que describe el ciclo diario tiene diferencias con respecto al indicado para el  $CO$  y  $NO_x$ : el ciclo diario de  $MP_{10}$  muestra un solo máximo diario que ocurre alrededor de la hora 20 y en general no se observa el máximo secundario en horas de la mañana ya que este pico secundario se muestra tímidamente solo en el mes de julio. El mínimo diario de concentración se detecta en horas de la mañana, en vez de pasado el medio día y paulatinamente comienza a subir hasta alcanzar el máximo diario en horas de la noche. Este comportamiento en el ciclo diario también se reportó en Rojas et al. (2020) para



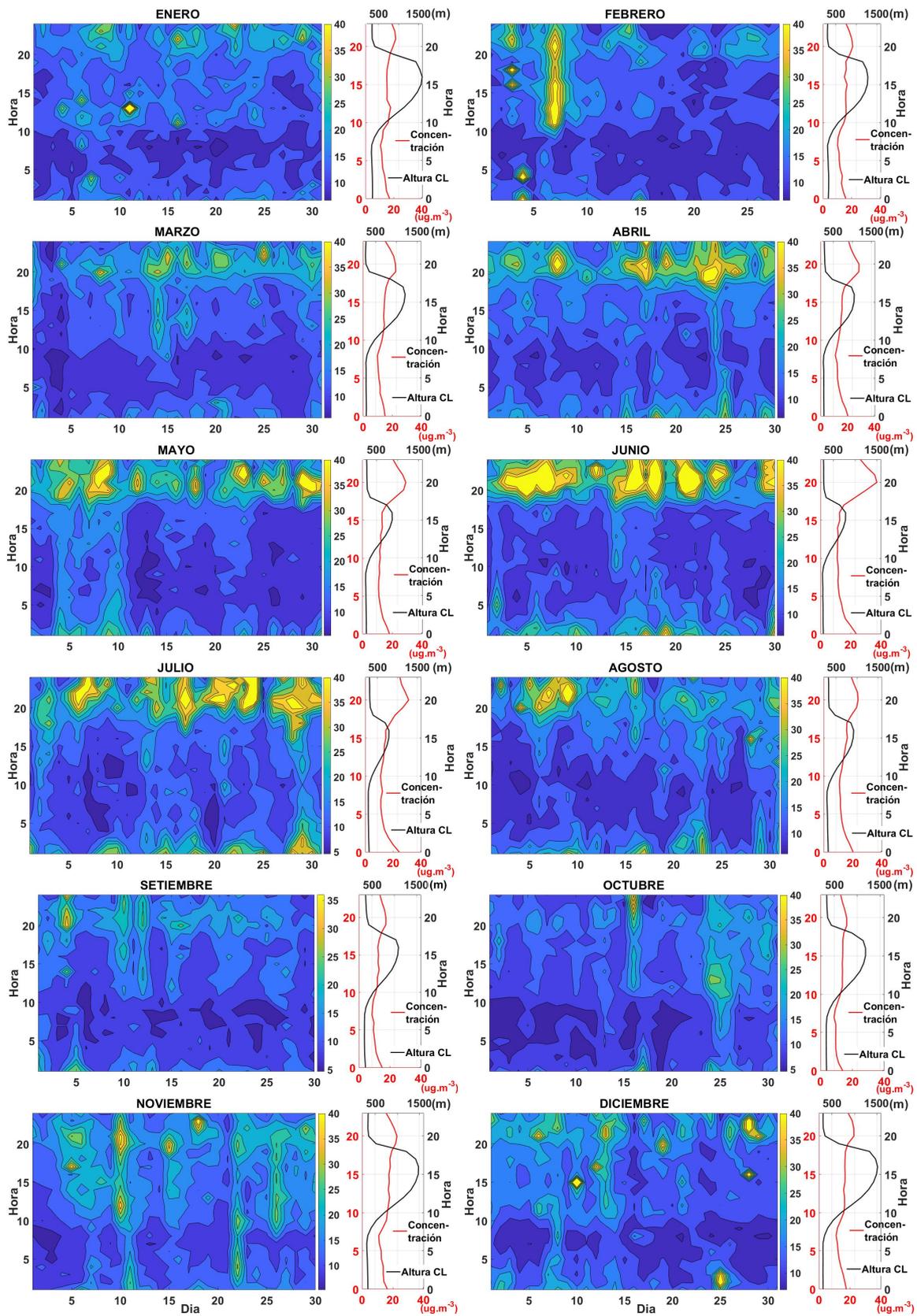
**Figura 5.14:** Boxplot de valores horarios de  $MP_{10}$ , en estación Ubici, agrupados por estaciones: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM), Junio-Julio-Agosto (JJA), Setiembre-Octubre-Noviembre (SON), expresados en  $\mu g.m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Período evaluado: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018.

la serie de datos de  $MP_{10}$  en sitios de medición urbanos de la ciudad de Buenos Aires.

Además, se puede observar que los máximos diarios (promedio) alcanzan valores más altos en los meses de mayo, junio y julio ( $29,1$ ,  $37,2$ ,  $31,2 \mu g.m^{-3}$ , respectivamente, registrados a las 20 horas) y en los meses restantes el máximo diario promedio disminuye notoriamente (en diciembre, enero y febrero se registraron valores máximos de  $22,5$ ,  $21,5$ ,  $20,8 \mu g.m^{-3}$  entre las 20 y 21 horas). Por otro lado, los valores mínimos diarios en promedio se registran entre las 7:00 y 8:00 horas y varían entre  $8,5$  y  $11,0 \mu g.m^{-3}$ , por lo que no varían significativamente de mes a mes.

Los valores de correlación entre la altura de la CLA y la marcha diaria de concentración por mes son muy diferentes a los hallados para los otros parámetros: son negativos entre abril y agosto y positivos para los meses entre setiembre y marzo. La correlación más alta se da en el mes de octubre y tiene un valor de  $0,43$  y le sigue en importancia la correlación hallada en setiembre con un valor de  $0,37$ ; el menor valor de correlación ocurre en junio, siendo de  $-0,37$  y le sigue el mes de mayo con un valor de  $-0,24$ .

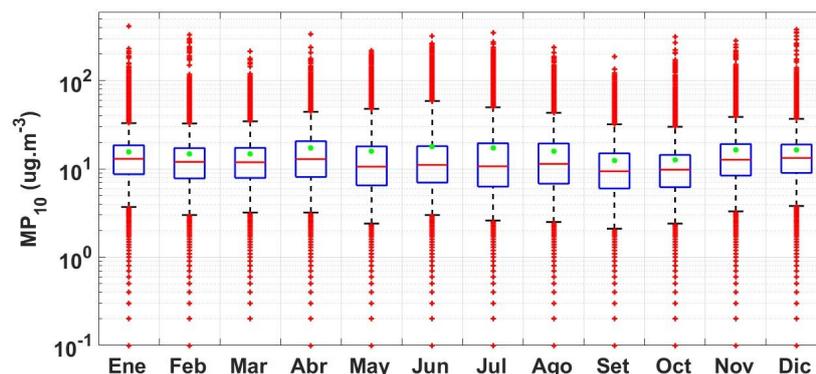
La diferencia encontrada en el ciclo diario de concentración del material particulado con respecto al ciclo diario de los gases y en la correlación con la altura de la CLA dan a entender que hay otros factores que pueden estar afectando la carga de material particulado en la atmósfera. Por ejemplo, Li et al. (2019), Zhong et al. (2019) y Rojas et al. (2020) destacan la influencia de la humedad relativa en bajar la concentración de partículas atmosféricas a través del efecto de remoción húmeda y además condiciones de estabilidad atmosférica por altas presiones y vientos débiles que se oponen a la



**Figura 5.15:** Evolución mensual y marcha diaria de valores horarios de  $MP_{10}$  en la estación Ubici, para el periodo entre 1 de enero del 2008 al 31 de diciembre del 2018, expresados en  $\mu g \cdot m^{-3}$

dispersión de este contaminante.

Los valores horarios agrupados mensualmente se muestran en la figura 5.16. Los valores medios del mes de junio y julio son los más elevados ( $17,9$  y  $17,3 \mu g.m^{-3}$ , respectivamente), aunque la diferencia con los que le siguen en orden de importancia es pequeña: en abril  $17,2$ , en noviembre  $16,5$  y diciembre  $16,3 \mu g.m^{-3}$ . Por otro lado, los meses con valores medios mas bajos son setiembre ( $12,4 \mu g.m^{-3}$ ) y octubre ( $12,6 \mu g.m^{-3}$ ), lo cual también coincide con lo informado en Rojas et al. (2020) sobre la marcha anual de este contaminante en la ciudad de Buenos Aires. La diferencia que se observa con lo informado por estos autores es que los valores medios superaron los  $20 \mu g.m^{-3}$  mientras que en Ubici los valores medios fueron menores (no superaron los  $18 \mu g.m^{-3}$ ). Esta diferencia en los valores medios informados puede atribuirse a que los sitios de medición analizados en Rojas et al. (2020) están fuertemente influenciados por el tráfico vehicular de la ciudad de Buenos Aires, mientras que Ubici se encuentra emplazada en las afueras de la ciudad de Fray Bentos, aunque sobre una ruta nacional muy transitada.



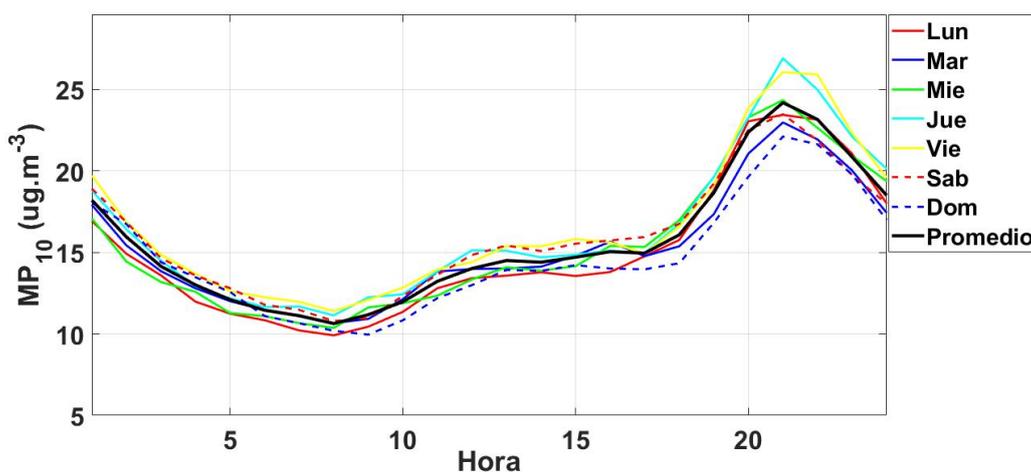
**Figura 5.16:** Boxplot de valores horarios de  $MP_{10}$  de estación Ubici, agrupados por mes, expresados en  $\mu g.m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Período: 1 de enero del 2008 al 31 de diciembre del 2018.

También se estudió el comportamiento de los datos horarios discriminados por días de la semana. La Figura 5.17 muestra la marcha diaria de los datos para cada día de la semana y se puede observar que las líneas se superponen desde el inicio del día hasta las 18 horas, cuando la línea punteada azul (marcha del domingo) comienza a apartarse quedando debajo de las restantes. A partir de la hora 20, las marchas del día jueves (línea celeste) y viernes (línea amarilla) superan a las restantes. Además, se muestran los valores horarios agrupados en boxplot, por día de la semana (ver Figura 5.18). Se aplicó un test no paramétrico (test de Man-Whitney-Wilcoxon) entre los distintos grupos y los resultados mostraron que no hay una diferencia estadísticamente

significativa entre los datos de los días lunes, martes, miércoles y domingos y, por otro lado, entre los datos de los días jueves y viernes (ver resultados de  $p\_valor$  en Tabla 5.4), lo cual se puede observar también en el gráfico de la marcha diaria.

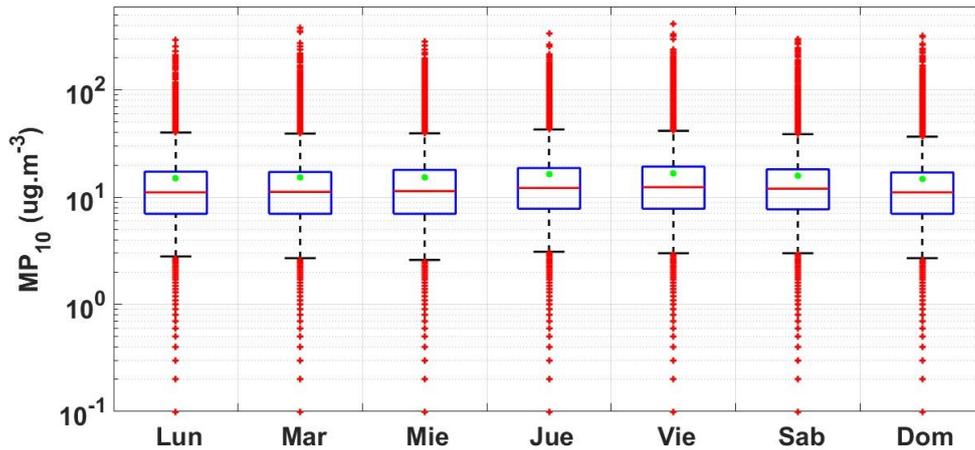
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Lunes	X	0,63	0,06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,63
Martes	-	X	0,14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,34
Miércoles	-	-	X	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
Jueves	-	-	-	X	0,19	0,01	< 0,01
Viernes	-	-	-	-	X	< 0,01	< 0,01
Sábado	-	-	-	-	-	X	< 0,01
Domingo	-	-	-	-	-	-	X

**Tabla 5.4:**  $p\_valor$  obtenido de aplicar el test Mann-Whitney-Wilcoxon entre los valores horarios de  $MP_{10}$  agrupados por días de la semana, para la estación Ubici en el período entre 1 de enero al 2008 al 31 de diciembre del 2018.



**Figura 5.17:** Marcha diaria de  $MP_{10}$  en estación Ubici, discriminados por día de la semana, expresados en  $\mu g.m^{-3}$ , para el periodo entre el 1 de enero del 2008 al 31 de diciembre del 2018

Estos resultados dan a entender que no hay una señal clara de la influencia de la dinámica de la zona urbana cercana al punto de observación en las series de datos de  $MP_{10}$ , la cual sí se puede distinguir en los resultados obtenidos para el  $NO_x$  y el  $CO$  y otros factores, como la meteorología local, pueden estar influenciando la carga del material particulado en el ambiente, como ya fue demostrado por otros autores (Zeri et al. 2011, Crawford et al. 2016, Zhong et al. 2019, Mao et al. 2020, Rojas et al. 2020, entre otros).



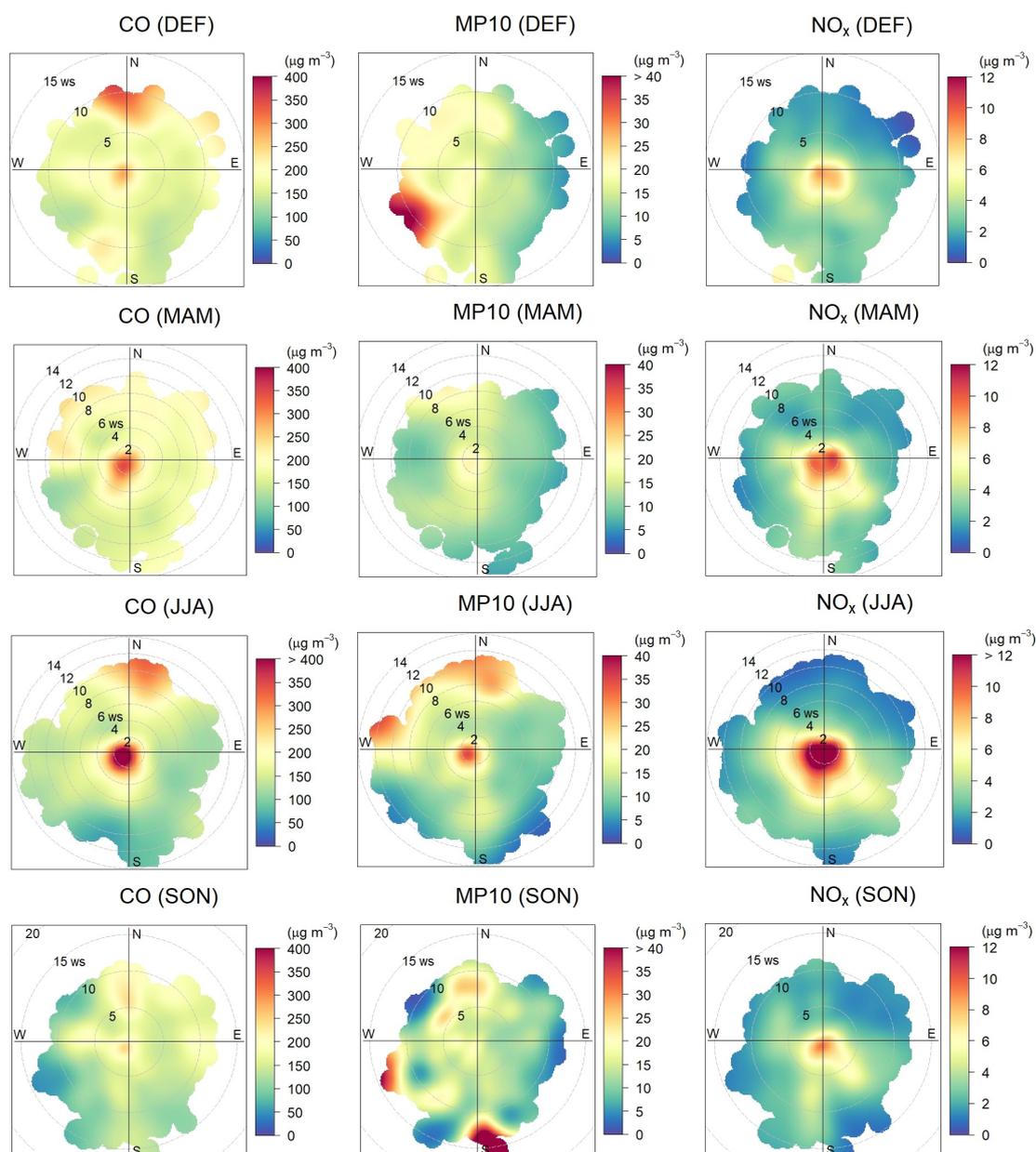
**Figura 5.18:** Boxplot de valores horarios de  $MP_{10}$  en estación Ubici, agrupados por día de la semana, expresados en  $\mu g \cdot m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Periodo evaluado: 1 de enero del 2008 al 31 de diciembre del 2018

## 5.4. Contaminantes y circulación atmosférica local y regional

Relacionar los valores de dirección y velocidad de viento con los registros horarios de concentración es útil porque da información sobre la ubicación de las fuentes emisoras de los contaminantes con respecto al sitio de observación. Los gráficos **polarplots** ofrecen la posibilidad de mostrar estas variables relacionadas en una sola imagen. A continuación, se muestran los polarplots construidos con los datos horarios de concentración y dirección y velocidad de viento, agrupados por trimestre y para cada contaminante, ver Figura 5.19.

El primer resultado a destacar de estas figuras es que las concentraciones más elevadas de  $NO_x$  (zonas de color naranja y rojo) están asociadas a registro de vientos débiles en todos los trimestres. Esto indica que la fuente de emisión de este gas se localiza muy cerca de la estación Ubici y se hipotetiza que es el tráfico vehicular de la zona, por estar emplazada muy cerca de una ruta de circulación nacional. Esta ruta además se encuentra al sur de la estación de medición lo cual hace que vientos del sur aumenten la concentración de  $NO_x$  en Ubici, mientras que para vientos del norte ocurre lo contrario. Por ello, la distribución de los máximos de concentración en el polarplot no es simétrico y muestra que se favorecen las altas concentraciones para vientos proveniente del sur.

Con respecto al  $MP_{10}$ , las figuras correspondientes a los distintos trimestres dan a entender que las concentraciones más elevadas están asociadas a distintas fuentes.



**Figura 5.19:** Polarplots de  $CO$  (columna izquierda),  $MP_{10}$  (columna central) y  $NO_x$  (columna derecha), discriminados por trimestre (DEF, MAM, JJA, SON, desde el panel superior al inferior) en estación Ubici. Periodo de estudio: entre 1 de enero del 2008 al 31 de diciembre del 2018, expresados en  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Durante el trimestre DEF se observa una señal de una fuente predominante ubicada al suroeste del punto de observación y las concentraciones más bajas están asociadas a vientos provenientes del noreste, este y sureste del sitio de observación. Este resultado da a entender que viento proveniente de este sector genera el efecto de limpieza de la atmósfera, principalmente para el  $MP_{10}$ , y la mayor carga de partículas es arrastrada desde el suroeste de la estación Ubici. Durante el trimestre MAM, se destaca la presencia de fuentes de emisión cercanas al sitio de observación y otra señal de fuentes de emisión mas alejadas, en el sector noroeste del punto de observación.

Igualmente, los máximos detectados en este trimestre son notoriamente menores a los detectados en los trimestres restantes. En JJA se identifican tres zonas de importancia en el origen de los contaminantes: una de ellas ubicada muy cerca del punto de observación, la segunda en dirección nor-noreste y la tercera, en dirección oeste. El efecto de limpieza de la atmósfera lo genera el viento proveniente del sector sureste y suroeste del sitio de observación. Para el trimestre SON se destacan dos zonas de emisión de importancia: una ubicada hacia el sur y otra al oeste-sur-oeste. La señal de la fuente local de emisión pierde importancia con respecto al trimestre previo. También se observa una zona de emisión de altas concentraciones al sector norte de la estación Ubici, la cual si coincide con lo identificado en los trimestres previos.

En cuanto al  $CO$ , todos los trimestres muestran concentraciones altas asociadas a vientos débiles, o sea, se observa influencia de fuentes locales de emisión (en el trimestre SON la fuente local tiene una señal muy débil). En el trimestre DEF se detecta una zona de origen de este contaminante de importancia ubicada al norte del sitio de observación, mientras que en MAM, la zona de mayor importancia de emisión es de una fuente local. Durante JJA, se destacan dos zonas de importancia. Por un lado, se observa la señal predominante de fuentes de emisión ubicadas localmente y en segundo lugar, se detecta una zona de menor importancia (con respecto a los valores de concentración hallados) ubicada al nor-noreste de la estación Ubici. Además, se observa que en este trimestre los vientos provenientes del sector sur generan el efecto de limpieza de la atmósfera ya que se observan concentraciones bajas de  $CO$  asociadas a velocidades de viento elevadas provenientes del sector sur-suroeste. En el trimestre SON, los valores de concentración más elevados están asociados a vientos débiles (o sea, a fuente local de emisión) y también se observa una zona ubicada al norte del sitio de medición indicando que hay un arrastre de este contaminante desde esta región.

En resumen, se destaca que en todos los trimestres se observa una señal de la fuente local de emisión en los tres contaminantes. Esta señal se hace particularmente fuerte en el trimestre JJA y le sigue en importancia el trimestre MAM, por lo que se hipotetiza que las condiciones meteorológicas locales durante el invierno (como el poco desarrollo vertical de la CLA) favorecen la acumulación de los contaminantes en la zona de estudio. Las principales fuentes de emisión locales están asociadas al tráfico vehicular de la zona y la quema de biomasa, principalmente, de uso residencial (Cataldo et al. 2019). Además, para el  $CO$  y  $MP_{10}$  en el trimestre JJA se observa una señal de contaminantes provenientes del sector noreste, por lo que se hipotetiza que existe un transporte de estos contaminantes desde otras regiones del continente, posiblemente originados en la quema de biomasa. Como se mencionó en el marco teórico (ver capítulo dos), esta práctica es habitual en los meses julio, agosto y setiembre en la región central de Brasil, Paraguay, centro-norte de Argentina y los productos originados pue-

den ser transportados hacia la región de estudio por los fenómenos de escala sinóptica que caracterizan la región.

## Capítulo 6

# Relación entre patrones de circulación sinópticos y contaminantes

Los fenómenos atmosféricos de diferentes escalas son uno de los factores que condicionan la calidad del aire de una región. En particular, los fenómenos de escala sinóptica pueden persistir por varios días y, como resultado, transportar y acumular contaminantes en una región que fueron originados en zonas lejanas. Las condiciones meteorológicas que se generan localmente bajo la influencia de un sistema sinóptico estacionario también pueden favorecer o desfavorecer la carga de contaminantes en la atmósfera. Por ejemplo, la presencia de un anticiclón por varios días sobre una región con presencia de fuentes contaminantes, puede favorecer la acumulación y generación de contaminantes secundarios como el  $NO_2$ , ya que días de baja nubosidad permiten mayor incidencia de radiación solar en superficie, desencadenando reacciones químicas entre contaminantes atmosféricos primarios (ver el marco teórico). Por otro lado, la persistencia de un frente estacionario puede provocar precipitaciones, generando el efecto de lavado de la atmósfera y, como resultado final, disminuir la carga de contaminantes atmosféricos. Por lo tanto, conocer cual es el efecto de distintos PC sobre la carga de contaminantes atmosféricos podría contribuir a pronosticar escenarios de calidad del aire con algunos días de anticipación.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de analizar la relación entre la carga de contaminantes atmosféricos en el centro-oeste de Uruguay y los PC sinópticos característicos de la región subtropical de América del Sur, durante la temporada de invierno, época en la cual se registran los valores medios y P95 de concentración de contaminantes más altos de todo el año.

En primer lugar, se analizaron dos tipos de eventos de contaminación registrados en la región de estudio: uno de ellos asociado a fuentes locales de emisión y el otro debido al transporte regional de contaminantes. A partir de este análisis se estudian las

condiciones sinópticas de la región que enmarcan episodios con estas características en el sitio observado y su relación con la carga de contaminantes en la atmósfera.

## **6.1. Análisis de eventos de contaminación en la región centro-oeste de Uruguay, durante el invierno**

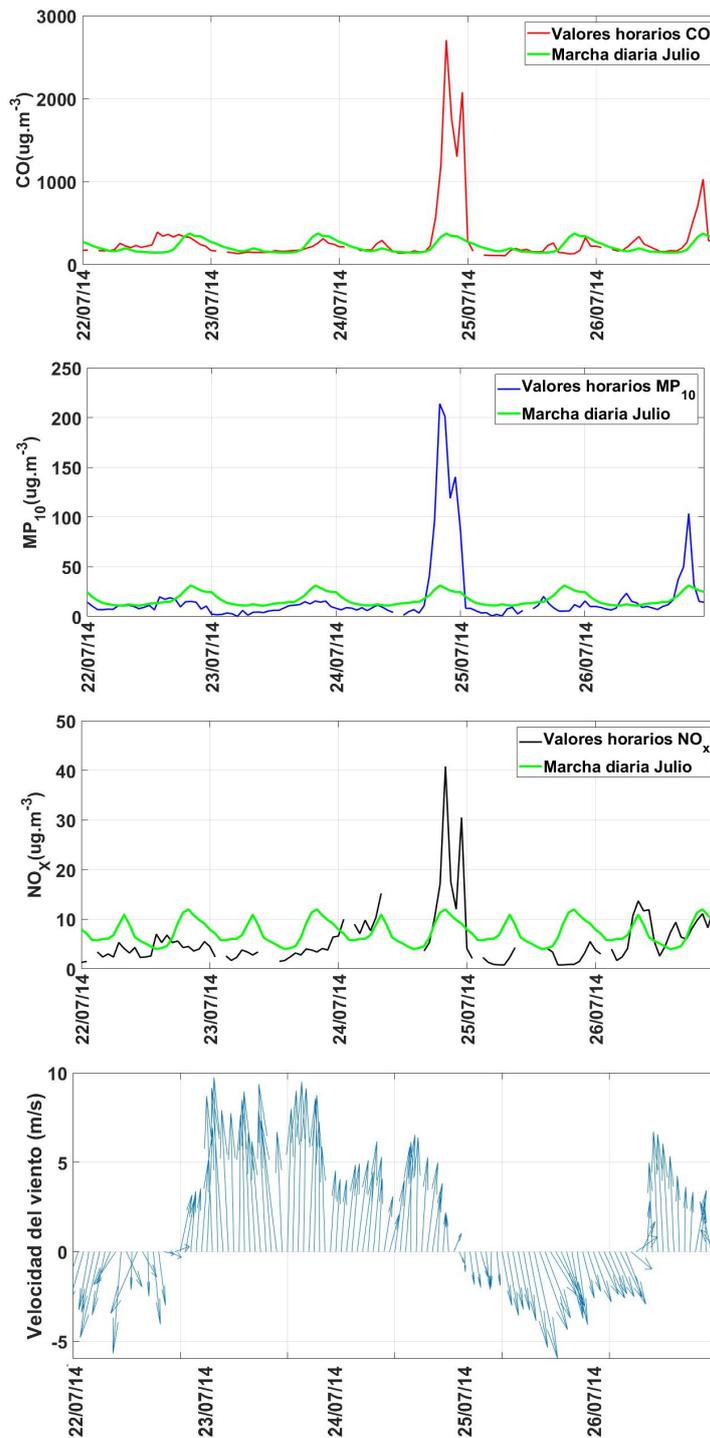
En esta sección se seleccionaron dos episodios de contaminación con características diferentes en la región centro-oeste de Uruguay. Por un lado se seleccionó un evento que presentó valores elevados de concentración de  $CO$ ,  $MP_{10}$  y  $NO_X$ , en forma simultánea. Este evento tuvo pocas horas de duración: entre las 18:00 horas del 24 de julio y la hora 01:00 del 25 de julio, del 2014. El segundo evento seleccionado se desarrolló entre el 26 y el 30 de julio del 2017. Este no se destacó por presentar valores muy altos de concentración, sino que se caracterizó por mostrar una evolución en las series de datos de  $CO$  y  $MP_{10}$  (en forma mas acentuada) diferente a la esperada, que es la marcha diaria promedio para el mes de julio (ver sección 5.1 para el  $CO$  y 5.3 en para el  $MP_{10}$ ).

### **6.1.1. Análisis de evento de contaminación debido a fuentes locales de emisión**

La Figura 6.1 muestra la evolución temporal de las series de datos horarios de concentración de  $CO$ ,  $MP_{10}$  y  $NO_X$  entre los días 22 al 26 de julio del 2014. También se presenta el vector viento que se registró localmente en el periodo mencionado.

El evento comenzó a desarrollarse a las 18:00 horas del día 24 de julio, en los tres contaminantes y a la hora 20:00 se registró el máximo de concentración:  $2706,2 \mu g.m^{-3}$  de  $CO$ ,  $40,8 \mu g.m^{-3}$  de  $NO_X$  y  $213,8 \mu g.m^{-3}$  de  $MP_{10}$ . Estos valores son notoriamente superiores al P95 de los datos agrupados en el trimestre JJA, los cuales son:  $534,2 \mu g.m^{-3}$  para el  $CO$ ,  $22,8 \mu g.m^{-3}$  para el  $NO_X$  y  $49,4 \mu g.m^{-3}$  para el  $MP_{10}$ . Luego del registro del máximo se observa una disminución de los valores de concentración, seguido por un pico de concentración secundario. Posteriormente, los valores de concentración disminuyen hasta que este evento finaliza. Esta secuencia se observa simultáneamente en los tres contaminantes estudiados (ver Figura 6.1).

La serie de dirección y velocidad de viento registrada localmente muestra que el día 22 de julio la zona de estudio se encontraba influenciada por viento proveniente del sector norte con intensidad leve y sobre el final del día se observa una rotación del sector norte al sur. En las horas en que se registró la disminución de la velocidad y el cambio de dirección se observa un leve aumento en los valores de concentración de



**Figura 6.1:** Serie de datos horarios de concentración de contaminantes (en orden superior a inferior):  $\text{CO}$  (línea roja),  $\text{MP}_{10}$  (línea azul),  $\text{NO}_x$  (línea negra) y vector viento (panel inferior), entre el 22 y el 26 de julio del 2014. La línea verde en cada panel representa la marcha diaria media de cada contaminante en el mes de julio.

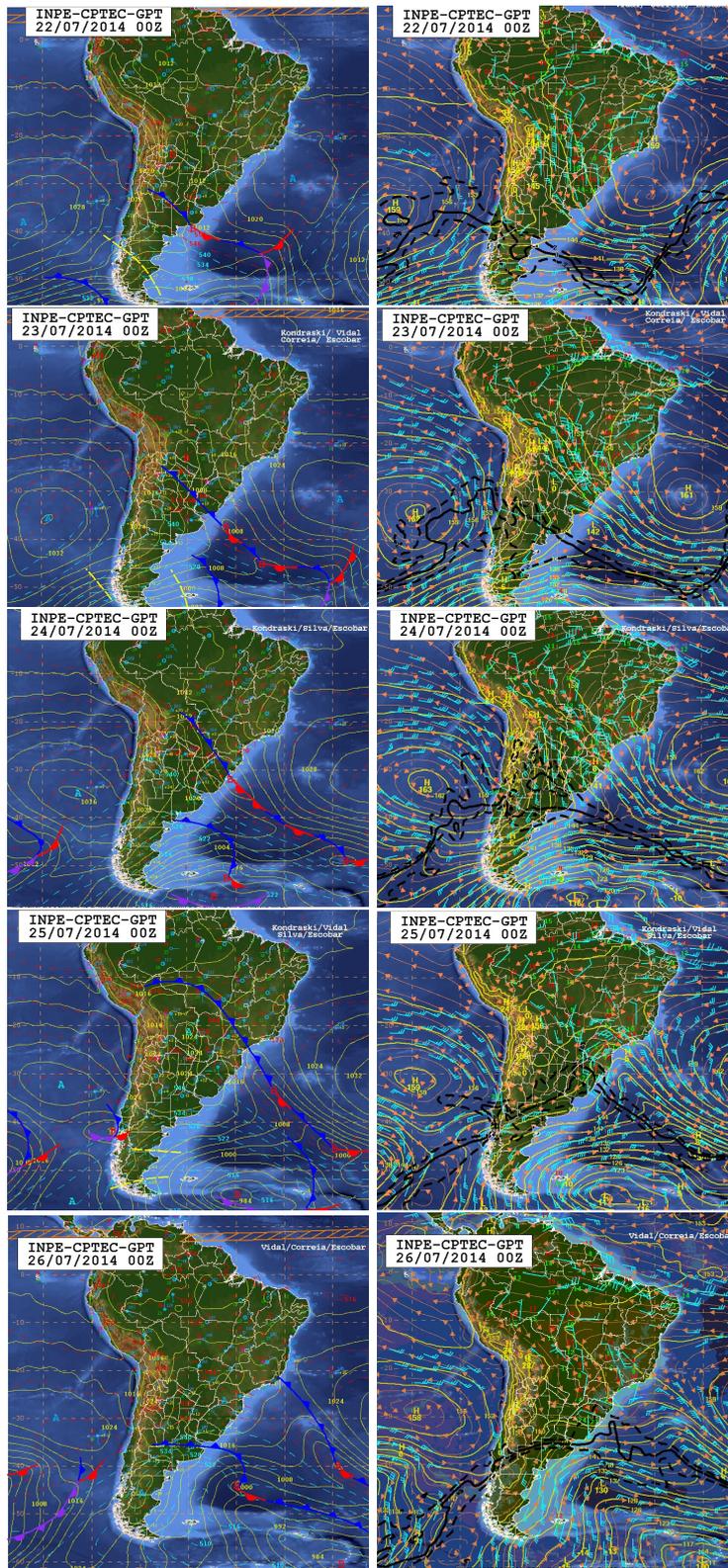
los tres contaminantes. A partir del día 23 de julio el registro de dirección del viento muestra persistencia desde el sector sur de viento intenso hasta el final del día 24 de julio. Durante ese periodo, los valores de concentración son bajos hasta que comienzan a elevarse cuando da inicio al evento de contaminación. Durante el desarrollo del

evento se registró una disminución paulatina del viento, hasta que la velocidad se hace nula, momento en el cual se registran los picos máximos de concentración. A la hora siguiente, el viento comienza a aumentar en intensidad pero con dirección de circulación opuesta: luego del registro de los picos se observó una rotación en la dirección del viento con dirección norte.

Esta evolución temporal da a entender que durante los días previos al evento, el viento persistente desde el sur contribuyó a la dispersión de los contaminantes generados localmente. Este resultado además es coincidente con lo mostrado en los gráficos de polarplot en el capítulo cinco: viento proveniente del sector sur está asociado a valores bajos (en promedio) de concentración. Luego, durante el periodo que se detectó la rotación del viento desde dirección sur a dirección norte, se registró un mínimo de velocidad por lo que no hubo un factor de dispersión de los contaminantes en la zona. Además, a este efecto debe sumarse el efecto de una CLA poco desarrollada, que se acentúa en horas de la noche y en los meses fríos. Ambos efectos se oponen a la dispersión de los contaminantes.

Para conocer el mejor el desarrollo del evento se analizó la situación sinóptica. La Figura 6.2 muestra las cartas sinópticas en superficie y en nivel 850 hPa a las 00 UTC, para el período entre el 22 y el 26 de julio. La carta sinóptica de superficie del 22 de julio muestra la presencia de un anticiclón con su centro situado sobre el océano Atlántico, al este del estado de San Pablo (Brasil). Sobre el territorio argentino se despliega un frente frío que avanza en dirección noreste. La carta de nivel 850 hPa muestra la corriente en chorro de capas bajas que alcanza el territorio uruguayo. La situación sinóptica descrita concuerda con los registros de viento medidos localmente, que muestran viento proveniente desde el norte, durante el día 22. Al día siguiente el frente frío avanzó sobre territorio uruguayo y este avance provocó también el desplazamiento de la corriente en chorro de capas bajas hacia el sur de Brasil. El cambio en la situación sinóptica se evidencia en el registro de viento local, donde se mostró una rotación en la dirección hacia el norte. En el día 24 de julio el frente alcanza el sur de Brasil y la carta de nivel 850 muestra sobre el sitio de observación viento del sector sur, situación que se mantiene desde el día previo. En cambio, el día 25 de julio sobre el territorio uruguayo se ubica una alta posfrontal que tiene asociada subsidencia sobre la zona de influencia. A nivel local se observa un debilitamiento y rotación el viento, que coincide con los picos de concentración detectados la noche del 24 de julio.

También se comparó la evolución de la situación sinóptica durante el evento con los resultados obtenidos por Arizmendi et al. (2022), donde se clasificó el comportamiento atmosférico en PC característicos. Para este evento, los PC detectados para cada día se muestran en la Figura 6.3. Allí se indica que el día de evento y el día previo se identificó el PC número 3, que representa la presencia de un sistema ciclónico al



**Figura 6.2:** Cartas sinópticas de superficie (izq.) y nivel 850 hPa (der.) de las 00UTC, para el periodo entre el 22 y el 26 de julio del 2014. Región de análisis: América del Sur.

sureste de América del sur. Este patrón marca la influencia de viento proveniente del sector suroeste en el sitio de medición. Es importante recordar que los PC hallados

en Arizmendi et al. (2022) representan al centroide de un cluster que tiene variación espacial. Por lo tanto, en lo que respecta al caso estudiado, se interpreta que las circulaciones observadas en las cartas sinópticas, si bien no son exactamente iguales a la circulación mostrada por el PC3 de Arizmendi et al. (2022), este PC es el que mejor se asimila a la situación observada.

Para los días -3 y -2 previos al día del evento (o sea, el 21 y 22 de julio), se identificó el PC5, que representa el desarrollo de una zona frontal al suroeste de Uruguay. La influencia de este sistema sobre el sitio de medición está asociada al registro de vientos débiles con dirección norte. Esta situación es muy similar a la ocurrida los días previos al evento estudiado de acuerdo a las cartas sinópticas mostradas.

Para finalizar, se concluye que el caso estudiado es un ejemplo de evento de contaminación cuya principal fuente de emisión es local y se intensificó debido a la situación meteorológica local, que responde a la circulación de escala sinóptica. Además, la transición entre los sistemas sinópticos descritos en este evento fue identificada como una de las transiciones predominantes en el trimestre JJA para la región (Arizmendi et al. 2022). Esto da a entender que la circulación de escala sinóptica contribuye a favorecer este tipo de eventos de contaminación en el sitio de estudio, durante el trimestre JJA.



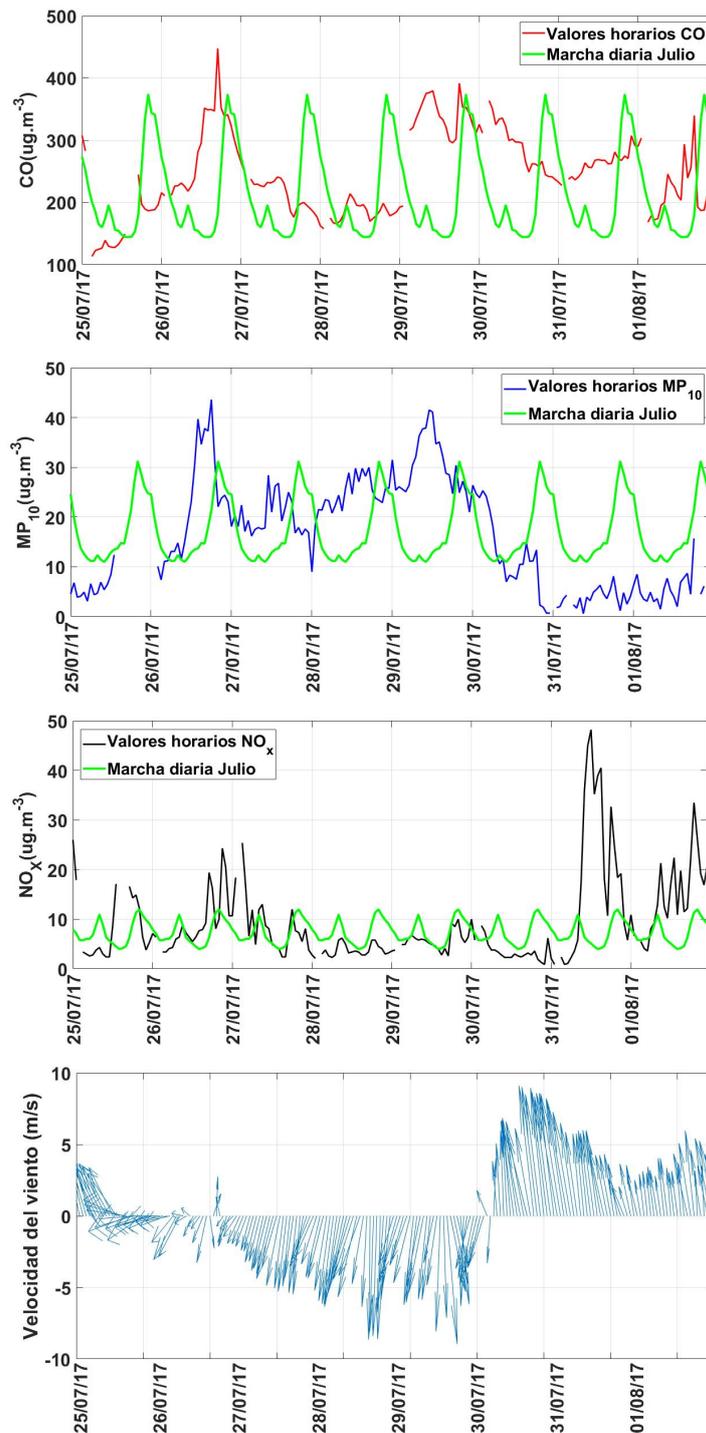
**Figura 6.3:** Patrones de circulación (PC) identificados para los días previos y posteriores al evento estudiado el día 24 de julio del 2014. Los PC fueron tomados de Arizmendi et al. (2022)

## 6.1.2. Análisis de evento de contaminación debido al transporte regional

El evento analizado a continuación se desarrolló entre el 26 y el 30 de julio del 2017. La Figura 6.4 muestra la serie de datos de los tres contaminantes entre el 25 de julio y el 1 de agosto del 2017, contrastada con la marcha diaria de cada contaminante para el mes de julio. Se eligió este caso porque las series de  $MP_{10}$  y  $CO$  no se comportaron según el ciclo diario encontrado para estos contaminantes en el sitio estudiado: no se observan máximos diarios en horas de la noche ni los mínimos diarios durante el día, sino que los valores de concentración aumentan con respecto a los valores medios registrados los días previos y se mantienen elevados por varios días. Principalmente se destaca este comportamiento en la serie de  $MP_{10}$  y no se observa una señal de este evento en la serie de  $NO_x$ . También se destaca que el inicio de este evento se refleja primero en la serie de  $MP_{10}$  y tres días posteriores en la serie de  $CO$ . Además, el gráfico de  $CO$  (ver Figura 6.4) presenta cortes diarios debido a los chequeos periódicos que realiza el equipo muestreador en forma automática (ver capítulo cuatro).

Se observó que el inicio del evento fue el día 26 de julio y paulatinamente comienzan a aumentar los valores de concentración de  $MP_{10}$ . Los registros de viento medidos localmente (Figura 6.4) muestran que desde el día 26 de julio la zona de medición estuvo influenciada por viento proveniente del norte y fue aumentando su intensidad con el correr de los días, manteniendo la dirección. El día 30 de julio se registró una rotación del viento y los días posteriores se mantuvo con dirección sur.

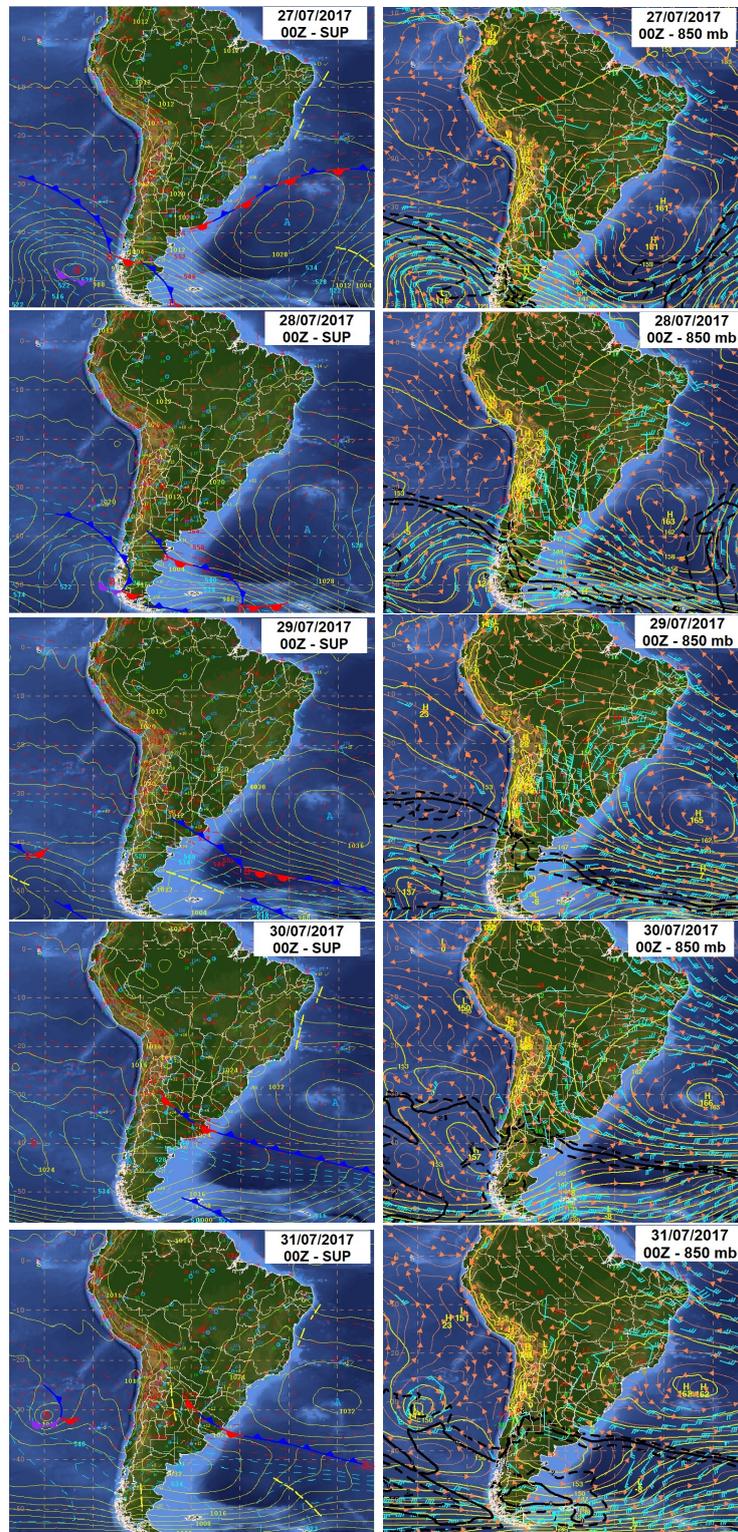
La Figura 6.5 muestra las cartas sinópticas en superficie y en 850 hPa para los días 27 al 30 de julio a las 00UTC, para América del sur. En la situación sinóptica del 27 de julio se destaca la presencia de un anticiclón centrado al sureste de Uruguay, sobre el océano Atlántico y se observa un frente estacionario que se extiende desde el sur de la provincia de Buenos Aires (Argentina), bordea el sistema anticiclónico y termina sobre el océano Atlántico. En la carta de 850 hPa se destaca la influencia de la circulación de capas bajas en dirección sur, al este de la cordillera y deflecta hacia el este sobre Uruguay. La carta sinóptica de superficie del día 28 tiene algunas diferencias con la del día previo: se mantiene la presencia del anticiclón sobre el océano Atlántico, al este de Uruguay, pero no se observa el frente estacionario al sur de nuestro país. En 850 hPa la circulación de capas bajas se ve acentuada y claramente está bordeando la región occidental del sistema anticiclónico. Se observa que esta circulación con sentido antihorario transporta aire desde la región este de Brasil hasta Uruguay, pasando previamente por Paraguay y nordeste argentino. El día 29, la configuración sinóptica para la región es similar a la de los días previos, pero en esta instancia un frente frío se aproxima a Uruguay desde el suroeste. Además, se observa un incremento en in-



**Figura 6.4:** Serie de datos horarios de concentración de contaminantes (en orden superior a inferior):  $CO$  (línea roja),  $MP_{10}$  (línea azul),  $NO_x$  (línea negra) y vector viento (panel inferior), entre el 25 de julio y el 1 de agosto del 2017. La línea verde en cada panel representa la marcha diaria media de cada contaminante en el mes de julio.

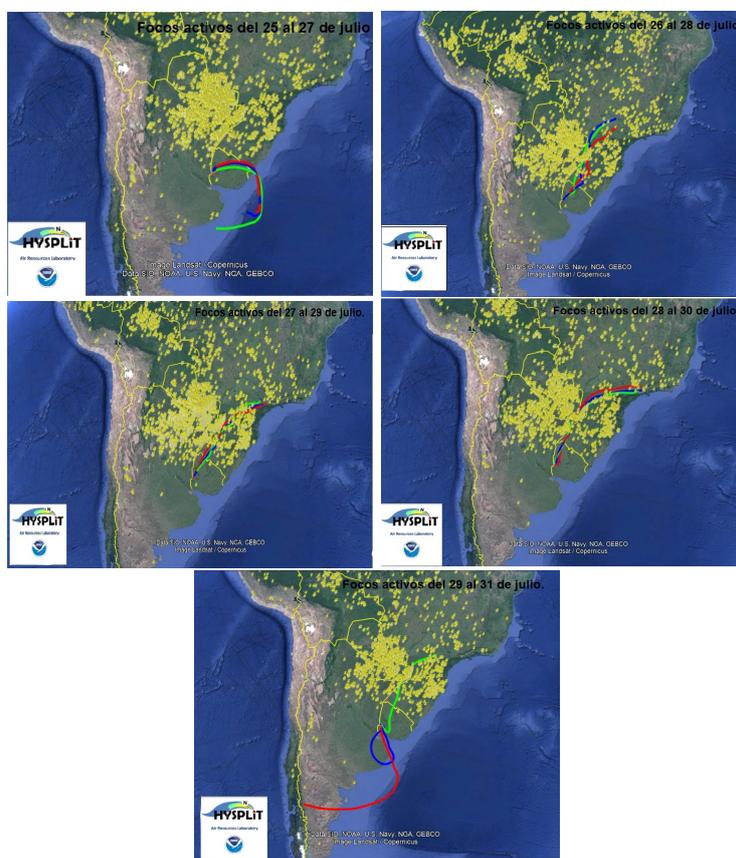
tensidad de la circulación de capas bajas, lo cual denota una correspondencia con los datos de dirección y velocidad de viento medidos en la zona de observación. Durante el día 30, la circulación de capas bajas se debilita levemente pero se mantiene la configuración del día previo. Por último, el día 31 el frente alcanzó el territorio uruguayo y

la circulación de capas bajas fue desplazada hacia el este. El registro del viento medido localmente muestra una rotación el día previo debido a la llegada del frente sobre territorio uruguayo que coincide con la caída de los valores de concentración de  $MP_{10}$  principalmente y  $CO$  con menor intensidad (ver Figura 6.4).



**Figura 6.5:** Cartas sinópticas de superficie y nivel 850 hPa de las 00UTC, para el periodo entre el 27 y el 31 de julio del 2017. Región de análisis: América del sur.

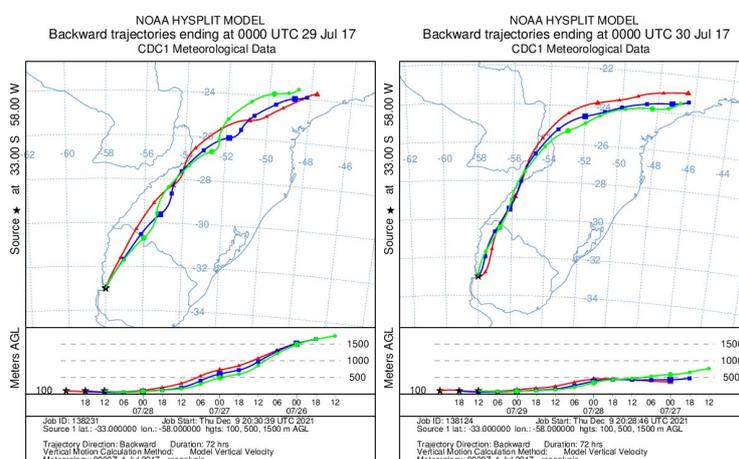
Este análisis se complementó con el cálculo de las trayectorias a través del modelo HYSPLIT. Se trazaron las trayectorias de las parcelas 72 horas previas al arribo al sitio de observación en los días 27 al 31 de julio a las 00 UTC (líneas de colores en las imágenes de la Figura 6.6). Además, la información de las trayectorias se cruzó con datos de focos de incendios activos detectados en América del sur 72 horas previas a la llegada de las parcelas al sitio (puntos amarillos en las imágenes de la Figura 6.6).



**Figura 6.6:** Trayectorias calculadas por el modelo HYSPLIT, para las parcelas que arriban al sitio de observación los días 27 al 31 de julio a las 00 UTC, representadas por líneas de colores que representan corridas con seis horas de diferencia entre ellas: la línea roja alcanza el sitio de observación a las 00 UTC, la línea azul seis horas antes y la verde doce horas previas a la línea roja. Los puntos amarillos representan los focos de incendio activos durante las 72 horas previas a arribo de las parcelas.

Las trayectorias que llegan al sitio de observación el día 27 de julio a las 00 UTC arriban con dirección este y no cruzan zonas con focos de incendios activos. Las concentraciones de  $MP_{10}$  del día 26 son altas con respecto a los días previos y la velocidad de viento local es baja, por lo que se puede interpretar que la fuente de contaminantes el día 26 es local. Las imágenes correspondientes a la llegada de las parcelas los días 28 al 30 de julio a las 00 UTC, muestran trayectorias provenientes del sector noreste y todas cruzan zonas de focos de incendios activos. La concentración de  $MP_{10}$  detectada entre los días 27 y 29 de julio muestran un aumento en los valores, mientras que para el  $CO$  el aumento comienza a detectarse a partir del día 29. Este aumento está

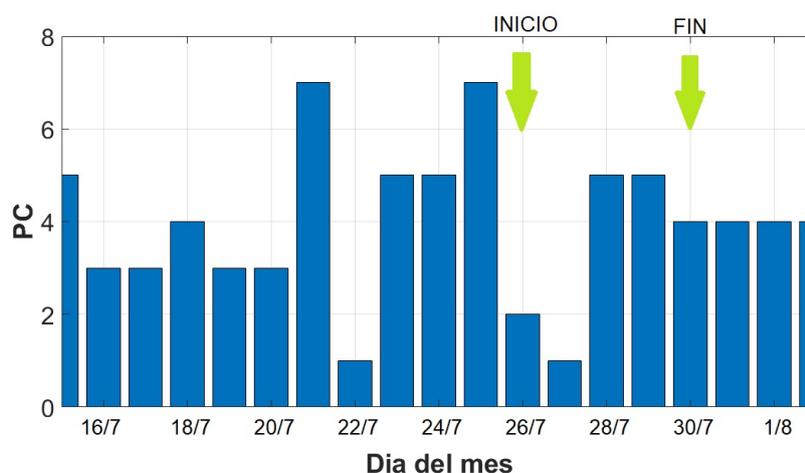
relacionado con el transporte de contaminantes que fueron emitidos por las quemas en la región sur de Brasil, noreste de Argentina, sureste de Paraguay y alcanzaron la región de estudio debido a la circulación regional sostenida por varios días consecutivos. La Figura 6.7 muestra el corte vertical de las trayectorias de las parcelas que arribaron al sitio de observación el día 29 y 30 de julio a las 00 UTC (panel inferior de cada figura). Allí se puede observar que los días previos las parcelas circularon sobre zonas con focos de incendios activos a alturas relativamente bajas: por debajo de los 1500 m las que arribaron el día 29 y por debajo de los 1000 m las que arribaron el día 30. Por lo tanto, es posible que las parcelas pudieran arrastrar contaminantes emitidos en las zonas con focos de incendios activos. A partir del día 30 de julio, los valores de concentración disminuyen producto del pasaje del sistema frontal, el cual también se ve reflejado en el cambio de dirección de las trayectorias de color rojo y azul en la última imagen de la Figura 6.6, siendo que cada línea representa trayectorias con diferencia de seis horas de arribo al sitio estudiado.



**Figura 6.7:** Trayectorias calculadas por el modelo HYSPLIT, para las parcelas que arriban al sitio de observación los días 29 y 30 de julio a las 00 UTC, representadas por líneas de colores que representan corridas con seis horas de diferencia entre ellas: la línea roja alcanza el sitio de observación a las 00 UTC, la línea azul seis horas antes y la verde doce horas previas a la línea roja.

Por último, se identificaron los PC para cada día de este evento. La secuencia de patrones se muestra en la Figura 6.8. El inicio del evento se identificó el día 26 de julio, el cual se clasificó como un PC2: este representa la presencia de un anticiclón posicionado sobre el océano Atlántico, el cual coincide con el sistema que se muestra en la carta sinóptica del día 27 a las 00UTC. El día 27 de julio fue identificado con el PC1: este patrón representa el sistema anticiclónico desplazado mas hacia el este con respecto al PC2 y sobre el sitio de medición se registra la influencia de viento proveniente del sector noreste. Según lo observado a partir de los polarplots construidos para  $CO$  y  $MP_{10}$  en JJA, viento proveniente del sector norte tiene asociados valores elevados de concentración en el sitio estudiado, lo cual es coherente con el aumento de con-

centración de  $MP_{10}$  durante esos días. Este patrón se puede identificar también en la carta sinóptica del día 28 a las 00 UTC de la Figura 6.5. El día posterior se registra una transición entre el PC1 y el PC5, el cual representa el desarrollo de un sistema frontal al sureste de Uruguay, el cual persiste por dos días (ver cartas sinópticas de los días 29 y 30 de julio a las 00 UTC). El evento finaliza el día 31 de julio, con el pasaje del frente frío y rotación del viento con dirección sur durante los días siguientes; esta situación se asemeja a la representada por el PC4. El efecto del pasaje del frente se puede visualizar principalmente en los valores de concentración de  $MP_{10}$  a partir del 31 de julio, lo cual es coincidente con lo mostrado en el polarplot, donde la circulación de dirección sur genera el efecto de limpieza atmosférica.



**Figura 6.8:** Patrones de circulación (PC) identificados para los días previos y posteriores al evento desarrollado entre el 27 y el 30 de julio del 2017. Los PC fueron tomados de Arizmendi et al. (2022)

## 6.2. Relación entre contaminantes y patrones de circulación sinópticos

Los eventos mostrados en la sección anterior tienen diferente origen. Por un lado, se estudió un evento de pocas horas de duración con picos altos de concentración detectados en forma simultánea en los tres contaminantes. A partir del análisis de la situación sinóptica que enmarcó el evento y de su influencia a nivel local, se concluyó que la fuente de los contaminantes está ubicada muy cerca del sitio de observación y que la meteorología local favoreció el aumento de la concentración de contaminantes. El segundo evento estudiado mostró una evolución muy diferente en los valores de concentración: tuvo varios días de duración y los valores de concentración no fueron tan elevados como los vistos en el caso previo estudiado. El evento se observó principalmente en la serie de datos de  $MP_{10}$ , mientras que en el parámetro  $NO_x$  no hubo

cambios significativos. El análisis realizado mostró que los contaminantes detectados fueron transportados desde el sur de Brasil, Paraguay y noreste de Argentina y su origen más probable son los focos de incendios detectados en esa región. Este transporte fue favorecido por la circulación de escala sinóptica presente durante el desarrollo del evento.

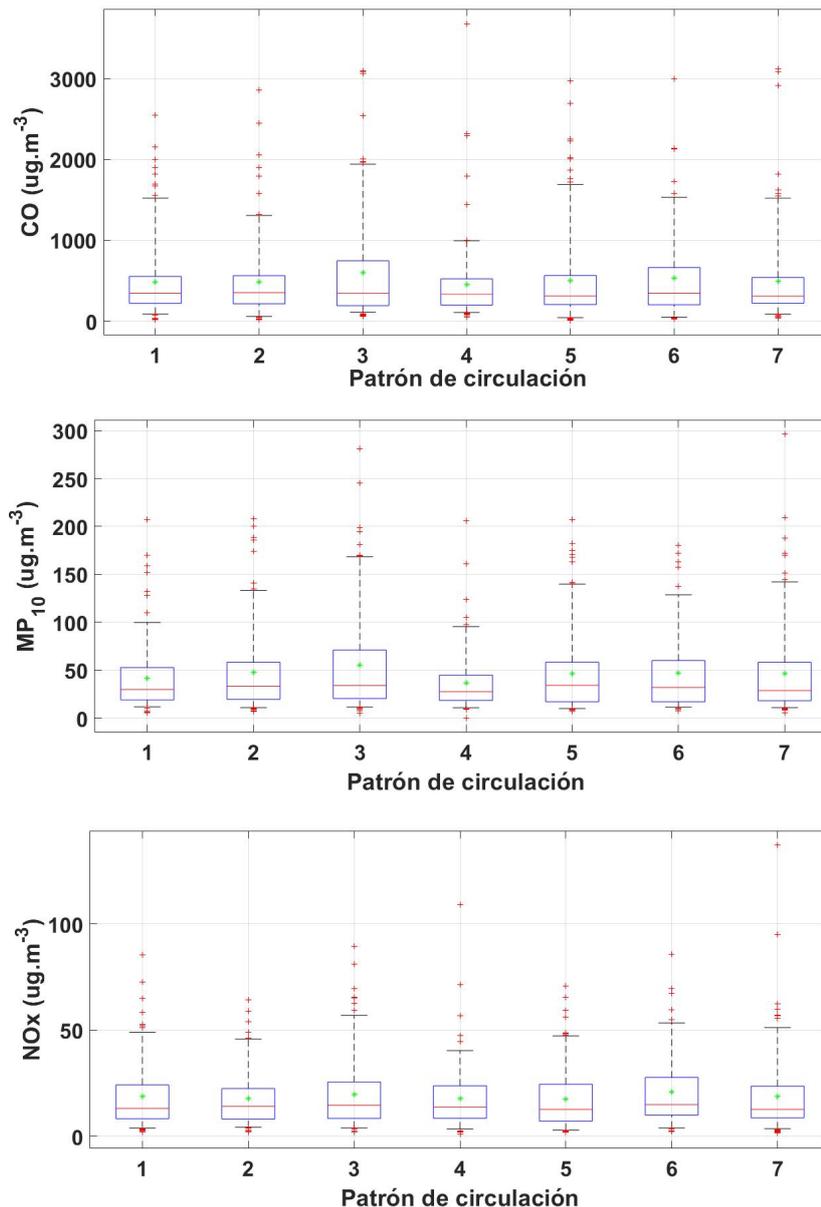
Por lo tanto, en vista de que los eventos de contaminación se vieron favorecidos por la circulación atmosférica, a continuación se muestran los análisis realizados que buscan profundizar en el conocimiento sobre la relación entre los PC y el comportamiento de los contaminantes atmosféricos. Estos análisis se enfocaron a estudiar dos tipos de eventos en forma generalizada: eventos de fuente local y de transporte regional.

### **6.2.1. Estudios de eventos de contaminación por fuente local**

El evento analizado en la sección anterior, originado por fuentes locales de emisión, presenta valores elevados de concentración que superan el P95 de los datos agrupados en el trimestre JJA. Los valores de concentración promedio para este período en los tres parámetros estudiados están alejados de los valores que representan un riesgo desde el punto de vista ambiental, pero los P95 de las series de datos horarios son valores muy elevados de concentración. Por lo tanto, los análisis mostrados en esta sección buscaron generalizar este tipo de eventos: específicamente se estudió la serie P95 de concentración diaria para el trimestre JJA.

En primer lugar, los valores de estas series de datos (P95 de concentración diaria para el trimestre JJA) se agruparon según el PC típico identificado para cada día y se construyeron boxplot para cada contaminante analizado, ver Figura 6.9. Los gráficos indican que las medias y las medianas de cada grupo tienen diferencias muy pequeñas entre ellos pero la dispersión varía notoriamente entre los distintos grupos; este resultado se observa para los tres contaminantes estudiados.

Para el caso de  $CO$  y  $MP_{10}$  se encontró que el PC3 es el grupo con mayor valor medio y P95 más elevado de los siete PC: el valor medio y P95 de  $CO$  es 600,9 y 1950,5  $\mu g.m^{-3}$ , respectivamente, y para el  $MP_{10}$  el valor medio y P95 es 55,0 y 168,5  $\mu g.m^{-3}$ , respectivamente. En el caso del  $NO_x$ , el valor medio más elevado se registró en el grupo del PC6 (21,0  $\mu g.m^{-3}$ ), mientras que el P95 más elevado se registró en el grupo del PC3 y es 57,6  $\mu g.m^{-3}$ . Es importante recordar que los valores medios de concentración en la estación JJA son: 211,0  $\mu g.m^{-3}$  para  $CO$ , 17,0  $\mu g.m^{-3}$  para  $MP_{10}$  y 6,9  $\mu g.m^{-3}$  para  $NO_x$ , por lo que los valores medios por PC triplican aproximadamente los valores medios estacionales. Se observó también que para los tres contaminantes el grupo del PC4 es el que muestra el menor intervalo entre el P95 y el P05: 898,1  $\mu g.m^{-3}$  en el  $CO$ , 85,6  $\mu g.m^{-3}$  en el  $MP_{10}$  y 39,7  $\mu g.m^{-3}$  en el  $NO_x$ . Además, se observa que

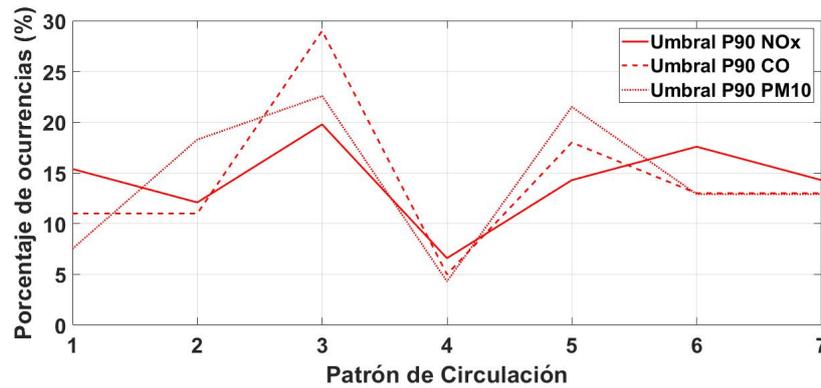


**Figura 6.9:** Boxplot de la serie de percentil 95 diario de concentración de  $CO$  (panel superior),  $MP_{10}$  (panel medio),  $NO_x$  (panel inferior), agrupados por PC, para el trimestre JJA, expresados en  $\mu g.m^{-3}$ . Las líneas negras representan el intervalo I95-I05, la caja azul representa el intervalo I75-I25, el marcador verde representa la media del grupo, la línea roja la mediana y los puntos rojos, los valores extremos (mayores al P95 y menores al P05). Periodo de estudio: 1 de enero de 2008 al 31 de diciembre de 2018.

el máximo valor para el parámetro  $CO$  se registró bajo la influencia del PC4 (3679,0  $\mu g.m^{-3}$ ) mientras que para el  $MP_{10}$  y  $NO_x$  ocurren bajo la influencia del PC7 (296,3 y 137,0  $\mu g.m^{-3}$ , respectivamente).

En la siguiente etapa se seleccionó el 10% de los valores mas elevados de la serie de percentil 95 diario del trimestre analizado y como resultado se obtuvieron en esta selección: 100 días para  $CO$ , 91 días para  $NO_x$  y 93 días para  $MP_{10}$ , que cumplían con este criterio. Estos valores se agruparon según el PC identificado el día en que se

registró el dato y se calculó el porcentaje de ocurrencias de cada PC. El resultado de la clasificación para los tres contaminantes evaluados se muestra en la Figura 6.10.



**Figura 6.10:** Porcentaje de ocurrencias de patrones de circulación, considerando los valores mas elevados de concentración para los tres contaminantes. Período de estudio: 1 de enero del 2008 al 31 de diciembre del 2018.

El primer resultado a destacar es que el PC con mayor frecuencia de ocurrencias asociado a valores muy altos de concentración en los tres contaminantes es el PC3, el cual representa la presencia de un sistema de baja presión ubicado sobre el océano Atlántico; el sector occidental de este sistema afecta al territorio de Uruguay, con vientos provenientes del sector suroeste. Este resultado es destacable debido a que este PC no es el patrón con mayor frecuencia de ocurrencias en el trimestre JJA para la región, sino que es el PC5, como se mencionó en el capítulo 4 (Arizmendi et al. 2022). Por lo tanto, se hipotetiza que este tipo de evento ocurren preferentemente bajo la influencia de una configuración sinóptica que se asemeja al PC3. El PC5 sigue en importancia de frecuencia de ocurrencia para el  $CO$  y  $MP_{10}$  (aunque esta señal es consistente con el resultado obtenido por Arizmendi et al. (2022) ya que el PC5 es el patrón con mayor frecuencia de ocurrencias en JJA), mientras que para el  $NO_x$  es el PC6; estos patrones representan: el desarrollo de un sistema frontal al sureste de Uruguay, con vientos débiles sobre el litoral oeste (PC5) y circulación de viento proveniente del sector norte sobre Uruguay (PC6). Por otro lado, el PC con menor frecuencia de ocurrencia para los valores muy altos de concentración es el PC4, en los tres contaminantes. Este patrón representa la incidencia de viento proveniente del sur sobre el territorio uruguayo.

Merece ser destacado que el evento estudiado en la sección 6.1.1 es uno de los casos agrupados cuyo desarrollo ocurrió bajo la influencia del PC3 en el estudio generalizado que se muestra a continuación.

Con el subgrupo de datos clasificados según el PC correspondiente se construyó un gráfico de dispersión de los valores de concentración; el resultado obtenido se muestra en la Figura 6.11. En la imagen se observa que el grupo de datos de  $CO$  asociados al PC4 tiene la mediana más elevadas (aunque es el PC con menor ocurrencia durante

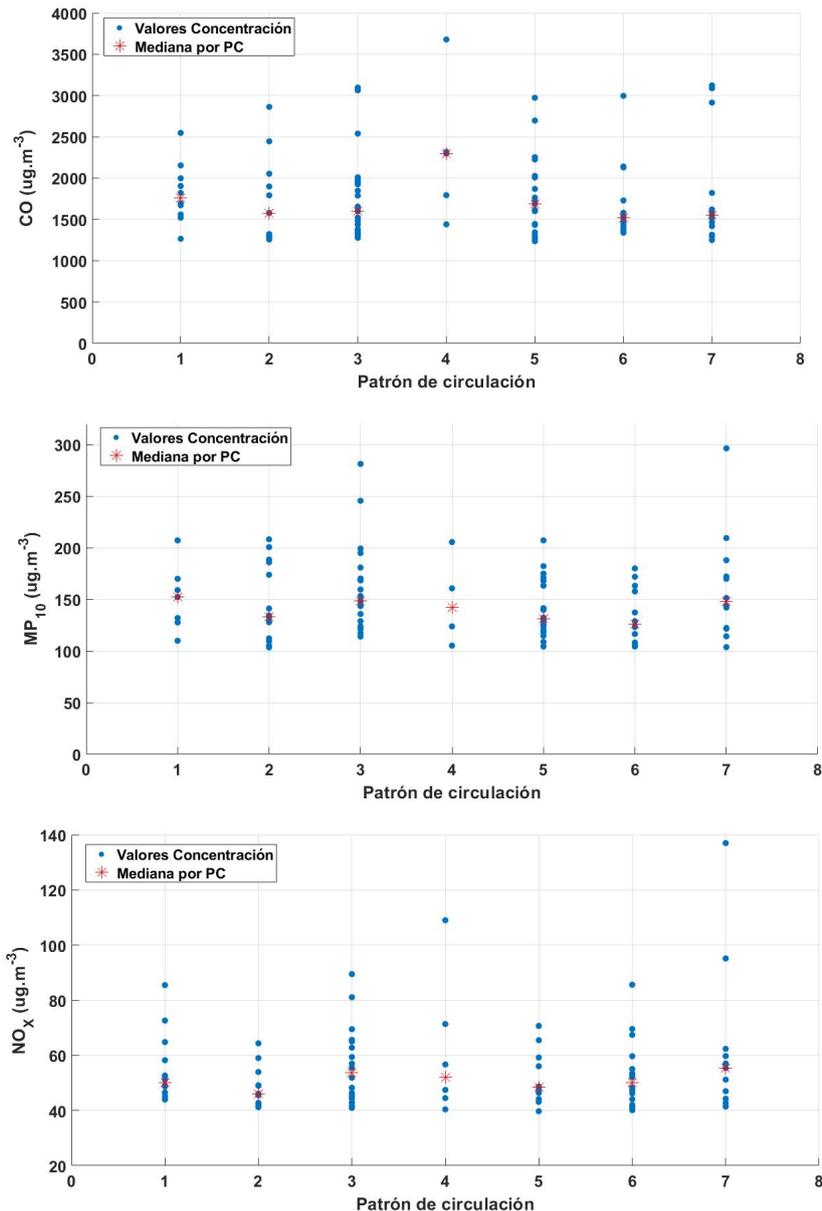
este tipo de eventos, por lo que este resultado está fuertemente influenciado por un caso en particular de valor muy elevado de concentración), para el  $NO_x$  la mediana mas elevada ocurre bajo el PC7 y, en el caso del  $MP_{10}$ , bajo la influencia del PC1. La Tabla 6.1 muestra un resumen del porcentaje de ocurrencias de cada PC durante los eventos estudiados y el P50 de concentración para cada grupo y cada contaminante. En resumen, para los tres contaminantes coincide que la mayor frecuencia de ocurrencias es bajo la influencia del PC3. Por otro lado, la mediana de concentración para el  $MP_{10}$  y  $NO_x$  son muy similares entre los distintos PC y para el  $CO$  se destaca el valor P50 bajo la influencia del PC4, pero, como se mencionó anteriormente, este resultado puede verse influenciado por el hecho de que se detectaron pocos eventos en este grupo.

Contaminante	Parámetro	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
$CO$	% de Ocurrencias	10	11	29	5	19	13	13
	P50 de concentración	1759,0	1577,7	1598,4	2297,9	1688,5	1515,9	1551,7
$MP_{10}$	% de Ocurrencias	7,5	18,3	22,6	4,3	21,5	12,9	12,9
	P50 de concentración	152,3	133,0	148,7	142,2	131,3	126,1	147,7
$NO_x$	% de Ocurrencias	15,4	12,1	19,8	6,6	14,3	17,6	14,3
	P50 de concentración	50,1	46,1	53,7	52,1	48,5	50,2	55,4

**Tabla 6.1:** Porcentaje de ocurrencias de Patrones de Circulación (PC) durante los eventos de contaminación por fuente local y P50 de concentración por PC expresados en  $\mu g.m^{-3}$ , por contaminante. Período evaluado: trimestre JJA desde el 2008 al 2018.

También se agruparon los días en los que coincidieron para los tres contaminantes registros muy elevados de concentración, o sea, mayores al P90 de la serie P95 de concentración diaria (esta condición no estaba implícita en el análisis previo). En total se detectaron 29 días. Los valores de concentración obtenidos se agruparon por PC y se distribuyeron de la siguiente manera: siete eventos en PC3, seis eventos en PC6 y seis en PC7, cuatro eventos en PC1, tres eventos en PC2 y tres en PC5. No se detectaron eventos en PC4. Los promedios de concentración por PC mas elevados fueron los siguientes:  $2453,8\mu g.m^{-3}$  para  $CO$  detectado en el PC2,  $193,2\mu g.m^{-3}$  para  $MP_{10}$  y  $67,6\mu g.m^{-3}$  para el  $NO_x$  detectados en el PC7. La Tabla 6.2 muestra el resumen de los valores medios encontrados por PC y porcentaje de ocurrencias para cada grupo. Se destaca nuevamente que la mayor frecuencia de ocurrencias de estos eventos ocurre bajo la influencia del PC3. La Figura 6.12 muestra los valores de concentración durante los eventos en días coincidentes, agrupados por PC. A partir de este gráfico se puede observar que el valor promedio mas elevado se detecta en el PC7 para el  $NO_x$  y  $MP_{10}$  debido a la influencia de un valor destacado que contribuye a generar un promedio alto.

El evento analizado en la primera sección de este capítulo mostró que los picos de concentración se detectaron bajo la influencia del PC3, resultado que concuerda con lo que se observó en la Tabla 6.1, para la generalización de los eventos de contami-

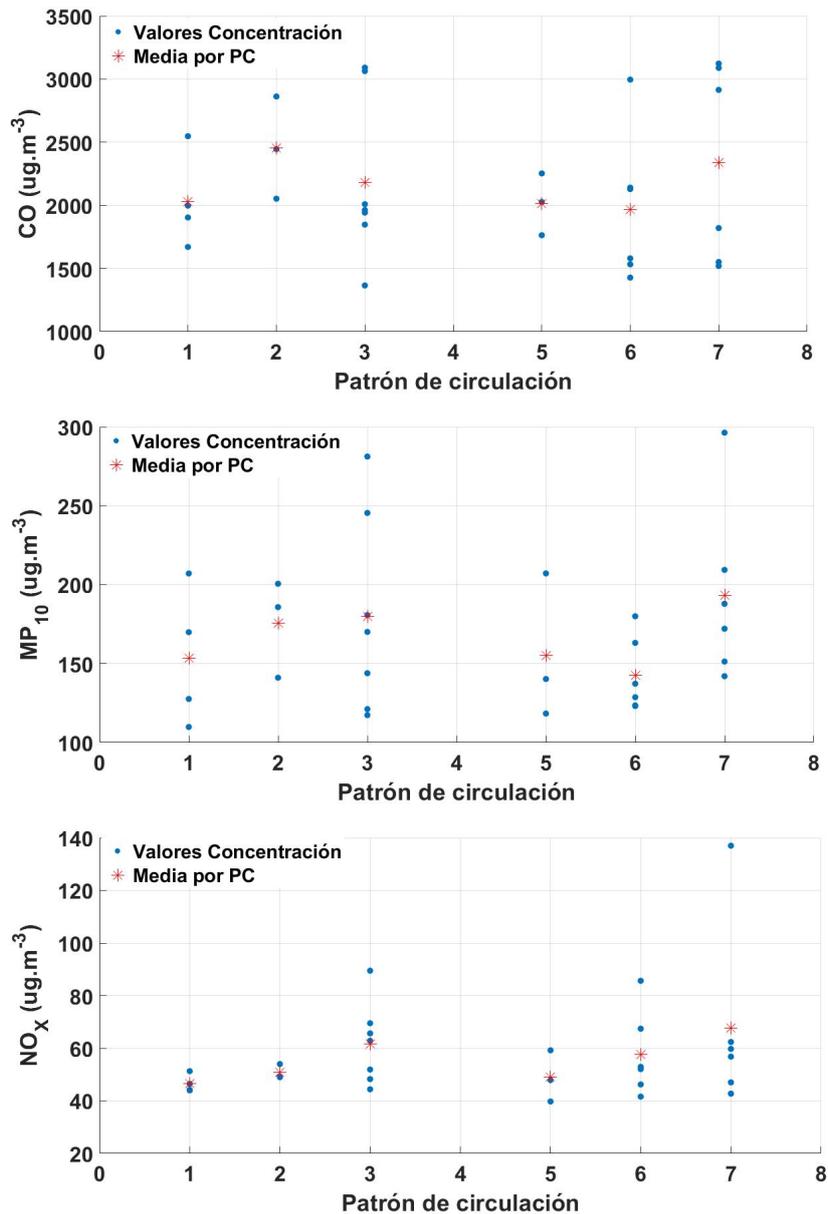


**Figura 6.11:** Scatterplot de la serie de valores mas altos de concentración (P90 de la serie de valores de P95 de valores diarios de concentración), agrupados por PC, para los tres contaminantes:  $CO$  (panel superior),  $MP_{10}$  (panel medio),  $NO_x$  (panel inferior), expresados en  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Periodo de estudio: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018. Estos resultados corresponden al trimestre JJA.

nación por fuente local y en el análisis realizado para el subgrupo de eventos en días coincidentes, ver Tabla 6.2. Por lo tanto se puede concluir que este PC genera en la zona de estudio condiciones meteorológicas que desfavorecen la dispersión de los contaminantes, los cuales se estima que están asociados a la emisión de quema de combustible sólido para calefacción en la región estudiada, principalmente en invierno. Si bien este PC es el que se presenta con mayor frecuencia, no es el que se asocia con mayores valores de concentración en el P50 de los casos estudiados y la interpretación de los resultados obtenidos es que el pico de concentración de estos eventos

Parámetro	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
% de Ocurrencias	13,8	10,3	24,1	-	10,3	20,7	20,7
Media concentración $CO$	2030,2	2453,8	2183,3	-	2014,6	1968,0	2336,6
Media concentración $MP_{10}$	153,6	175,8	180,0	-	155,3	142,6	193,2
Media concentración $NO_x$	46,5	50,7	61,7	-	48,9	57,6	67,6

**Tabla 6.2:** Porcentaje de ocurrencias de Patrones de Circulación (PC) durante los eventos de contaminación que coinciden en los tres contaminantes y valores medios de concentración por PC expresados en  $\mu g.m^{-3}$ , por contaminante. Período evaluado: trimestre JJA desde el 2008 al 2018.



**Figura 6.12:** Concentraciones detectadas los días de evento que coinciden los tres contaminantes, agrupados por PC, para los tres contaminantes:  $CO$  (panel superior),  $MP_{10}$  (panel medio),  $NO_x$  (panel inferior), expresados en  $\mu g.m^{-3}$ . Período de estudio: 1 de enero 2008 al 31 de diciembre 2018. Estos resultados corresponden al trimestre JJA.

ocurre durante la transición del PC3 hacia un nuevo PC o entre circulaciones similares que se agrupan dentro del PC3.

## 6.2.2. Estudio de eventos de contaminación por transporte regional

El caso de evento de contaminación por transporte regional analizado en la sección 6.1.2 mostró que este tipo de eventos no se caracterizan por presentar valores elevados de concentración sino que la evolución de las series de datos se aparta de la marcha diaria típica encontrada en el capítulo 5. Además, la duración de estos eventos puede alcanzar varios días. También se observó que estos eventos se observan principalmente en la serie de  $CO$  y  $MP_{10}$  y el  $NO_x$  no se ve afectado por eventos de transporte regional de contaminantes. Por lo tanto, para estudiar estos eventos, durante la temporada de invierno, se seleccionaron los días cuyos valores mínimos diarios superaron el P75 de la serie de mínimos diarios, al menos por tres días consecutivos, solo para la serie horaria de  $CO$  y  $MP_{10}$ .

Durante el período estudiado (2008 al 2018) se detectaron en el trimestre JJA 28 eventos en la serie de  $CO$  y 25 eventos de  $MP_{10}$ . El cálculo del P50 de los días de duración de los eventos mostró que el  $CO$  tiene una mediana de duración de 4,5 días y el  $MP_{10}$  de 4 días. También se observó que para el  $CO$  estos eventos ocurren principalmente en junio y agosto (10 y 12 eventos detectados, respectivamente) y en el caso de  $MP_{10}$ , de los 25 eventos detectados, 10 se observaron en julio y 10 en agosto. La tabla 6.3 muestra el resumen de los datos mencionados en los párrafos previos.

Contaminante	Total eventos	Eventos Jun	Eventos Jul	Eventos Ago	Días de duración (P50)
$MP_{10}$	25	5	10	10	4
$CO$	28	10	6	12	4,5

**Tabla 6.3:** Total de eventos detectados durante el período evaluado y discriminado por mes, para el trimestre JJA y P50 de los días de duración de los eventos. Período evaluado: 2008 al 2018.

Se calculó también la frecuencia de ocurrencia de PC desde tres días previos a que finalicen los eventos, hasta el día final, ver tabla 6.4. Se encontró que en el día final de los eventos predominan en ocurrencia el PC5 para el  $CO$  y los días previos predominan en ocurrencia: PC5 el Día -1, PC1 y PC2 el Día -2 y PC1 el Día-3. El PC1 y el PC2 representan la presencia de un anticiclón sobre el océano Atlántico, cuya influencia sobre el sitio de medición es viento intenso proveniente del noreste en el caso del PC1 y viento proveniente del este en el caso del PC2. Durante el PC5 sobre el sitio de medición se observa viento proveniente del sector norte, con menos intensidad que los casos PC1 y PC2, debido a la llegada de un sistema frontal desde el oeste del sitio.

Los patrones predominantes encontrados concuerdan con lo observado en el análisis del evento de transporte regional (sección 6.1.2), donde se detectó que el origen de los contaminantes podría estar asociado a los focos de incendios activos en el sur de Brasil, Paraguay y noreste Argentino.

Para el parámetro  $MP_{10}$  predominan el PC3 y PC5 el día final de los eventos. Los Días -1 y -2 predominan el PC1 y PC3 y el Día-3 predomina el PC3. Durante el evento estudiado los PC detectados fueron: el PC4 el Día final del evento, el PC5 en el Día-1 y Día -2 y el PC1 en el Día-3, por lo que el evento analizado no es el caso típico que se estudio en la generalización de este tipo de eventos.

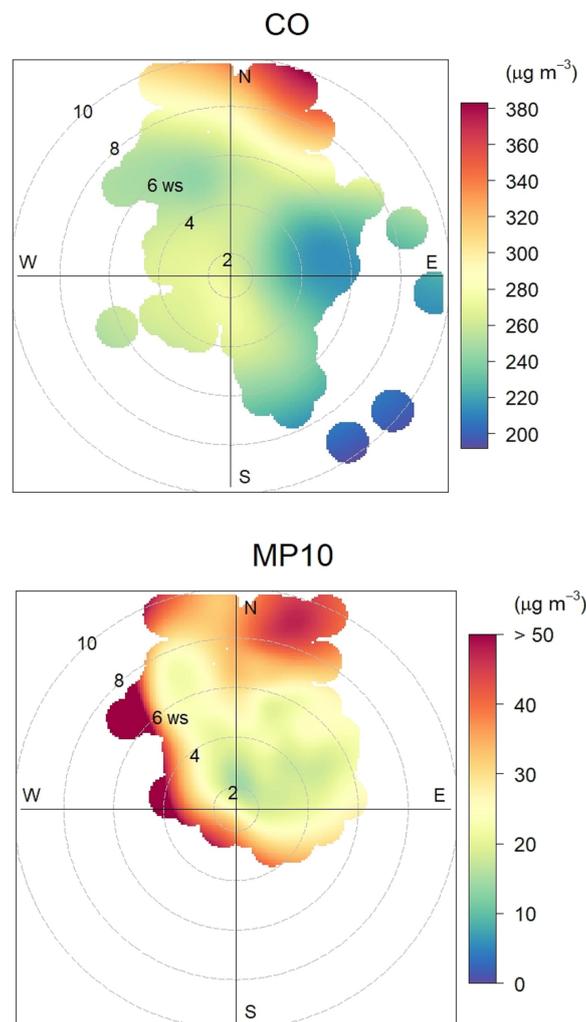
Contaminante	Día	%PC1	%PC2	%PC3	%PC4	%PC5	%PC6	%PC7
$CO$	Día Final	11	21	7	4	32	18	7
	Día -1	18	14	0	0	36	18	14
	Día -2	29	29	0	7	21	7	7
	Día -3	32	11	0	11	11	0	7
$MP_{10}$	Día Final	8	4	24	8	24	20	12
	Día -1	24	0	28	0	16	20	12
	Día -2	24	0	28	0	12	16	20
	Día -3	20	7	40	0	0	7	27

**Tabla 6.4:** Porcentaje de ocurrencias de PC los últimos cuatro días de los eventos detectados, por parámetro. Período evaluado: 2008 al 2018.

Al contrastar estos resultados con los polarplots presentados en el capítulo previo, se puede observar que el predominio de ocurrencia del PC1 y PC5 para el caso del  $CO$  coincide con el resultado encontrado en el polarplot, donde se muestra una asociación entre concentraciones altas de  $CO$  y viento proveniente del sector norte y noreste, como lo muestra la Figura correspondiente al PC1 y PC5. En el caso del  $MP_{10}$  el predominio del PC1 y PC5 también concuerda con lo observado en el polarplot mostrado en el capítulo cinco para el trimestre JJA, donde se destacan diferentes direcciones (o sea, diferentes fuentes de origen) desde donde puede provenir este contaminante: desde el norte y desde el oeste-noroeste. Sin bien el PC3 representa sobre la zona de estudio viento desde el suroeste, el polarplot podría estar mostrando una leve diferencia en la dirección de origen (entre el oeste-noroeste que se ve en el polarplot y suroeste que muestra la circulación del PC3) que podría estar asociada a la variabilidad espacial de la estructura del cluster.

Para este tipo de eventos también se seleccionaron los casos en que coinciden temporalmente. Se encontraron 6 casos en que se observó este tipo de comportamiento en las series de  $CO$  y  $MP_{10}$  simultáneamente: cuatro de ellos ocurrieron en agosto, uno en junio y uno en julio. Si bien son pocos casos para establecer una estadística significativa, la mayoría de los eventos ocurren durante la estación seca en el centro de Sudamérica que abarca desde julio a setiembre (ver marco teórico, Riaño et al. 2007), cuando se observa mayor ocurrencia de focos de incendios activos por las quemadas

biomasa en la Amazonia, El Cerrado y sur de Brasil. Con los registros de viento local durante los días en que se desarrollaron los eventos se construyeron polarplots para ambos contaminantes, ver Figura 6.13.



**Figura 6.13:** Polarplot con valores horarios de  $CO$  (panel superior) y  $MP_{10}$  (panel inferior), expresados en  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , para los días de eventos de transporte regional coincidentes.

En la Figura asociada al  $CO$  para estos eventos se observa claramente una señal que representa concentraciones altas provenientes del sector norte y noreste la cual se atribuye al transporte de contaminantes desde este sector. En cuanto al  $MP_{10}$ , las concentraciones mas elevadas se asocian a viento proveniente del sector noroeste y oeste pero también se observan valores altos de concentración asociados a viento proveniente del noreste atribuibles al transporte de este contaminante. Por lo tanto, estos eventos quedan bien asociados al transporte regional de contaminantes originados en la quema de biomasa en la región central de América del sur. Además, se detecta la presencia de otra (u otras fuentes) de  $MP_{10}$  que no están identificadas en estos análisis.

Para finalizar, el predominio del PC5 el día final del evento en ambas series de datos es congruente con que este patrón representa la entrada de un frente por el oeste del país. Esto implica que al día siguiente que se registra este PC se produce una transición de este patrón sinóptico a otro patrón que cambiará la circulación sinóptica (y local), que marcará la finalización del evento de transporte regional.

# Capítulo 7

## Conclusiones

El objetivo general de este trabajo es profundizar en el conocimiento sobre la calidad del aire en la región centro-oeste de Uruguay. Para ello se plantearon objetivos específicos que consistieron en realizar un análisis exploratorio de tres contaminantes monitoreados en la zona de estudio ( $CO$ ,  $NO_x$  y  $MP_{10}$ ), analizar eventos de contaminación asociados a fuentes locales de emisión por un lado y por otro al transporte regional de contaminantes, para cuantificar el impacto de estos eventos sobre la calidad del aire local y por último, estudiar la relación entre los valores de concentración y los patrones de circulación regionales.

El análisis exploratorio de los contaminantes mencionados abarcó el período entre el 1 de enero del 2008 al 31 de diciembre del 2018. Se encontró que el  $CO$  tiene una gran variabilidad y presenta un comportamiento cíclico de frecuencia estacional. El trimestre JJA es el período con mayor valor medio y P95 de la serie de datos horarios agrupados por trimestre y SON es el período que presenta menor valor medio y P95 (diferencias estadísticamente significativas, según el test de Mann-Whitney-Wilcoxon). El análisis de la serie temporal a escala mensual mostró que junio es el mes que presenta mayor valor medio y P95 más alto, mientras que los meses que presentan valores medios más bajos son octubre, noviembre y diciembre. Estos resultados coinciden con los observados por otros autores que atribuyeron valores elevados de contaminantes en los meses más fríos debido al efecto de menor desarrollo de la capa límite el cual se opone a la dispersión de los contaminantes.

A escala diaria, la serie de datos de  $CO$  muestra un ciclo diario definido, con dos picos: el máximo diario se observa entre las 20 y 22 horas y el máximo secundario se observa en horas de la mañana. En promedio, el mínimo diario se observa después del medio día. Este ciclo se acentúa en los meses de mayo, junio y julio mientras que en los meses cálidos se debilita. Al comparar este ciclo con la marcha diaria de la CLA se puede observar que tienen un comportamiento opuesto: el máximo de la CLA ocurre después

del medio día mientras que el mínimo en horas de la noche. Además, este ciclo se ve fuertemente intensificado en los meses fríos. Este patrón de escala diaria discriminado por mes también fue observado por otros autores que enfocaron sus análisis en zonas urbanas con influencia de tráfico vehicular y se atribuye a varios factores. Por un lado, el efecto de la meteorología local, como la variación de la altura de la CLA que tiene un comportamiento estacional. Por otro lado, la influencia de las fuentes de emisión presentes en la zona de estudio como la quema de leña muy usada para calefacción en el sector residencial, que contribuye a intensificar el máximo de concentración en horas de la noche y las emisiones provenientes del tráfico vehicular que contribuyen a intensificar el pico de concentración en horas de la mañana.

En el análisis de concentración a escala diaria discriminado por día de la semana, no se encontró una diferencia significativa entre las marchas diarias de cada día, excepto entre la del día viernes con la del domingo a miércoles. Este resultado se debe a que la marcha diaria del viernes se aparta de las restantes, principalmente en horas de la noche y el pico en horas de la mañana es superior que en los otros días. También se observó una pequeña diferencia en la marcha diaria del día domingo en horas de la mañana, ya que no se observa el pico de la mañana característico en el resto de los días.

Los análisis realizados para el  $NO_x$  mostraron que este gas tiene un comportamiento promedio similar al  $CO$ : la serie de datos también presenta un variabilidad importante, el trimestre JJA es el grupo que presenta mayor valor promedio y P95 y el trimestre SON es el que presenta menor valor medio y P95 (diferencias estadísticamente significativas). El análisis de escala mensual mostró un ciclo anual marcado: los valores medios, medianas y P95 son más elevados durante los meses fríos (desde mayo a agosto) mientras que disminuyen en los meses cálidos (de octubre a febrero). Para este gas también se construyó el ciclo diario por mes y, al igual que para el  $CO$ , se observó dos picos diarios: el máximo del día ocurre entre las 19 y 21 horas y el segundo máximo se detecta entre las 8 y 9 horas; el mínimo diario, en promedio, ocurre pasado el medio día. También se observó que el máximo del ciclo diario mensual se registra en junio, cuando el ciclo diario está bien marcado. Durante los meses más cálidos este ciclo se muestra muy suavizado, al punto que entre los meses de noviembre a febrero el pico secundario de la mañana es despreciable. Este resultado da a entender también que el efecto sobre la dispersión de estos contaminantes que genera la altura de la CLA es un factor predominante que condiciona el ciclo diario de concentración durante el correr del año.

En cuanto al ciclo diario discriminado por día de la semana, la marcha del día domingo muestra valores medios más bajos que el resto de los días. Este resultado se atribuye a la dinámica tráfico vehicular que es la principal fuente de emisión de este contaminante

en la zona.

El gráfico de la serie de datos horarios de  $MP_{10}$  muestra una fuerte variabilidad de este contaminante, pero no se observa un comportamiento de frecuencia estacional tan claro, como si se ve en la serie de datos horarios de  $CO$ . Sin embargo, los datos agrupados estacionalmente muestran que el trimestre JJA presenta el valor medio y P95 más alto de las cuatro estaciones. Además, el test no-paramétrico muestra una diferencia estadísticamente significativa entre los distintos trimestres. Por otro lado, el trimestre SON es el grupo con menor valor medio, P95 y P05 de los cuatro trimestres, al igual que se mostró en los contaminantes previamente analizados.

En cuanto al ciclo diario de concentración discriminado por mes, se observa un patrón diferente al resto de los parámetros: no se observan dos picos diarios de concentración, sino que, el mínimo diario se registra en horas de la mañana y paulatinamente comienzan a subir los valores de concentración hasta alcanzar el máximo diario en horas de la noche, alrededor de las 20 horas. Este resultado coincide con el reportado por otros autores (Rojas et al. 2020) que mostraron ciclos diarios de concentración de este contaminante en la ciudad de Buenos Aires de comportamiento similar. Por otro lado, al igual que lo observado con los gases, el mes con mayor valor medio y P95 son junio y julio y los meses setiembre y octubre son los que muestran valores medios más bajos.

Por otro lado, en la marcha diaria discriminada por días de la semana, no se observa una diferencia significativa entre los días, excepto para el jueves y viernes, que en horas de la noche se separan de los días restantes. No se observa la diferencia entre el día domingo y los demás días en horas de la mañana, como ocurre con los gases y este resultado se atribuye a que la fuente de emisión principal asociada no es el tráfico vehicular de la zona, como ocurre con los gases estudiados.

En resumen, en los tres contaminantes los valores más elevados (en promedio) se detectan en el mes de junio y en horas de la noche y un factor determinante en este resultado es el efecto de una CLA poco desarrollada. La marcha diaria del  $CO$  y  $NO_x$  muestran comportamiento similar, con dos picos diarios bien marcados en los meses fríos, mientras que la marcha diaria del  $MP_{10}$  solo presenta un pico diario. Esta diferencia podría deberse a las fuentes emisoras principales asociadas a cada contaminante, las cuales coinciden para el  $CO$  y  $NO_x$  y es el tráfico vehicular, mientras que para el  $MP_{10}$  podrían haber otras fuentes emisoras que no fueron identificadas; también podría haber una asociación con otras variables meteorológicas que no fueron analizadas en este trabajo (por ejemplo, la humedad relativa). En esta tesis no se estudió el origen de esta diferencia, pero es importante resaltar que la marcha diaria encontrada para cada contaminante coincide con los resultados publicados por otros autores.

A partir de los gráficos polarplots se pueden destacar resultados de importancia en cuanto al origen local o remoto de los contaminantes. En primer lugar, durante el trimestre JJA se observan valores elevados de concentración de los tres contaminantes asociados a valores bajos de velocidad de viento dando a entender que existen fuentes de emisión de estos muy cercanas al sitio de medición. Además, para el  $CO$  y  $MP_{10}$  también se observan valores elevados de concentración asociados al transporte proveniente del sector norte y nor-noreste (en el caso del  $CO$ ) y del sector nor-noreste, norte, noroeste y oeste-noroeste para el caso del  $MP_{10}$ . Por lo tanto, surge la hipótesis de que en la estación Ubici hay influencia de fuentes emisoras de estos contaminantes que se encuentran alejadas del sitio de medición (transporte regional de contaminantes) en el trimestre JJA. Los polarplots de  $NO_x$  para los trimestres restantes también muestran una señal de fuente de emisión local, pero los valores medios de concentración detectados son menores a los hallados en JJA. Estos resultados dan a entender nuevamente que el efecto del desarrollo vertical de la CLA es predominante en la acumulación de contaminantes durante JJA. Los polarplots de  $CO$  en los trimestres MAM y DEF muestran una señal clara de una fuente de emisión local y en DEF se destaca también la influencia de contaminantes provenientes del sector norte. Por último, para el  $MP_{10}$  se observa que el contaminante proviene de diferentes fuentes según el trimestre analizado: en DEF hay influencia de contaminante proveniente del sector suroeste principalmente. En MAM se observa influencia de contaminante proveniente del sector noroeste (con menor intensidad que en el trimestre DEF) y en SON hay tres sitios asociados al origen de contaminantes, ubicados al sur, oeste-suroeste y, con menos intensidad, al norte de la estación Ubici. Los resultados observados en los polarplots indican que la circulación regional predominante para cada estación juega un rol fundamental en la calidad del aire de la zona estudiada ya que puede favorecer el transporte de contaminantes desde otras regiones hacia la zona de estudio.

La segunda etapa de análisis de esta tesis se concentró en la estación JJA ya que es el trimestre que mostró los valores de concentración promedio más elevados en los tres contaminantes analizados. En primer lugar, se seleccionaron dos eventos de contaminación diferentes desarrollados en el trimestre JJA. Uno de ellos se caracterizó por mostrar valores de concentración elevados (superiores al P95 de la serie de datos diarios en el trimestre JJA) en los tres contaminantes, durante un corto periodo de tiempo: desde las 18:00 horas del 24 de julio a la hora 01:00 del 25 de julio del año 2014. A partir del análisis de las cartas sinópticas de superficie y en nivel 850 hPa y de los registros de viento medidos in situ, se concluyó que el evento de contaminación se desarrolló durante un corto período de debilitamiento en la velocidad del viento que favoreció la acumulación de contaminantes en el sitio. Las condiciones generadas localmente responden a la situación sinóptica de la región durante el día previo y pos-

terior al desarrollo del evento: días previos se observó el pasaje de un frente frío y en la zona de estudio se observó viento sostenido proveniente del sur. Luego del pasaje del frente, se desarrolló un sistema anticiclónico que afectó la zona de estudio. Este fenómeno fue el que desencadenó el evento de contaminación debido al efecto de subsidencia y el debilitamiento del viento en la zona de influencia. Además, la transición entre PC5 y PC3 detectada los días previo al evento responde a comportamientos típicos encontrados para el sudeste de América del sur según se indica en Arizmendi et al. (2022).

El segundo evento estudiado se caracterizó por mostrar valores de concentración que aumentaron paulatinamente durante varios días consecutivos y no muestran un ciclo diario típico como el descrito en el capítulo cinco, para el trimestre JJA. Además, este evento se detectó particularmente en la serie de datos de  $MP_{10}$ , con menor intensidad en la serie de  $CO$  y no se observó este comportamiento en la serie de  $NO_x$ . El período de estudio dió inicio el día 26 y finalizó el 30 de julio del 2017. También se analizaron las cartas sinópticas de superficie y en 850 hPa durante los días del evento y se observó la presencia de un sistema anticiclónico centrado sobre el océano Atlántico, al sureste de Brasil. Además, se observó una configuración de circulación en capas bajas caracterizada por recorrer el este de la cordillera andina durante el día 28 y 29 de julio y girar con dirección sur para desembocar sobre Uruguay. Esta configuración sinóptica favorece el transporte regional de parcelas de aire proveniente de la zona centro y sur de Brasil, sur de Paraguay, noreste argentino hacia nuestro país. El análisis combinado con las trayectorias de las parcelas trazadas por el modelo Hysplit y la información recabada sobre cantidad de focos de incendios activos en el sudeste de América del sur durante el desarrollo del evento, da a entender que los contaminantes medidos en la estación Ubici fueron originados en los incendios detectados en el sur de Paraguay, sur de Brasil y noreste de Argentina y transportados hacia la zona de estudio por la circulación sinóptica de la región. Este resultado es consistente con los observados en los polarplot para el trimestre JJA, donde se muestra una señal de transporte de  $CO$  y  $MP_{10}$  desde las regiones mencionadas. Sin embargo, no se observa esta señal en la serie de datos de  $NO_x$  durante el evento y es también consistente con el polarplot, el cual muestra que el origen del contaminante es principalmente de fuentes locales.

En la última parte de la tesis se buscó generalizar la circulación atmosférica asociada a los dos tipos de eventos estudiados previamente.

En los eventos de contaminación por fuente local, el PC3 se asocia con mayor frecuencia de ocurrencia a estos eventos en los tres contaminantes. Este resultado es destacable porque la configuración sinóptica con mayor ocurrencia en nuestra región durante JJA se asocia al PC5 (ver capítulo cuatro) por lo que es significativo que este tipo de eventos tiendan a ocurrir preferentemente bajo la influencia de PC3. Por otro

lado, el patrón con menor frecuencia de ocurrencia es el PC4. En cuanto a los valores de concentración hallados para los grupos discriminados por PC, se encontraron resultados distintos para cada contaminante: en la serie de  $CO$  el P50 del grupo es mayor bajo la influencia del PC4 (aunque este resultado está influenciado por un evento en particular de los cuatro casos detectados en este análisis), en  $MP_{10}$  bajo la influencia del PC1 y para el  $NO_x$  bajo la influencia del PC7; además, ninguno de ellos coincide con el PC de mayor frecuencia de ocurrencias.

Por último, el análisis generalizado de los eventos de transporte regional de contaminantes se realizó para la serie de datos de  $CO$  y  $MP_{10}$  debido a que no se mostró señal de transporte de contaminantes en la serie de  $NO_x$  en el polarplot. Durante el periodo estudiado (trimestre JJA desde el 2008 al 2018) se detectaron 28 eventos de transporte en la serie de  $CO$  y fueron mayormente detectados en junio y agosto. En la serie de  $MP_{10}$  se detectaron 25 eventos y en su mayoría se detectaron en el mes de julio y agosto. La media de duración de estos eventos es de 4,5 días para el  $CO$  y 4 días para el  $MP_{10}$ .

En cuanto a los PC predominantes durante estos eventos, se observa que en el  $CO$  predominan el PC1 el Día -3, el PC1 y PC2 en el Día -2 y el PC5 el Día -1 y Día final del evento. La influencia de la circulación generada por los PC en la zona de estudio (viento proveniente del sector noreste) es coincidente con lo observado a partir del polarplot, donde se muestra una señal de transporte de contaminante proveniente del sector mencionado. Luego del pasaje del frente que se observa en la figura del PC5, el viento cambia de dirección dando por finalizado el evento de contaminación por transporte. En cambio, los patrones predominantes para el  $MP_{10}$  son el PC3 el Día -3 al Día -1 y el Día final predomina el PC3 y PC5. También hay una frecuencia de ocurrencia que le sigue en importancia, del PC1 el Día -2 y Día -1. Estos dos PC representan el transporte del contaminante desde dos direcciones diferentes como se observa en la figura del polarplot. Al igual que en el  $CO$ , luego del PC5 el Día final del evento, la transición de este PC a otra configuración de circulación pone fin al evento de contaminación.

El análisis específico de los eventos que coinciden temporalmente en ambos contaminantes arroja como resultado que estos eventos se detectan en su mayoría durante la temporada seca de la región central de América del sur, cuando ocurre con mayor frecuencia la quema de biomasa en la región. Los polarplot construidos muestran claramente que hay un transporte de contaminantes  $CO$  y  $MP_{10}$  desde el sector norte y noreste hacia la zona de estudio. Estos resultados confirman que la estación Ubici se ve influenciada por contaminantes originados en otras regiones del continente.

Comparando ambos tipos de eventos, en promedio, los eventos de contaminación por fuente local son más significativos que los eventos de transporte regional, desde el

punto de vista de los valores de concentración detectados, a pesar de que tienen una duración mucho menor. Además, los eventos de origen local son observables en los tres parámetros analizados, mientras que la serie de datos de  $NO_x$  no se ve afectada cuando hay transporte de contaminantes desde otra región.

La zona de estudio en esta tesis se limitó a la región centro-oeste de Uruguay, específicamente a la ciudad de Fray Bentos. Por lo tanto, se sugiere como trabajo a futuro extender la zona de análisis a otras regiones del país. Además, en esta tesis no se consideró el análisis de los contaminantes con otras variables meteorológicas como lluvia, radiación, humedad relativa, lo cual podría aportar más información al análisis exploratorio realizado, como sugieren los resultados del análisis exploratorio del contaminante  $MP_{10}$ . Otro factor que debería considerarse en futuros análisis es la influencia de las fuentes de emisión en la zona de estudio, ya sea el tráfico vehicular como las tasas de emisión de las distintas industrias de la región, que podrían explicar la diferencia en los ciclos diarios encontrados para los días de semana y fines de semana en los diferentes contaminantes. Por último, los análisis de la segunda etapa (mostrados en el capítulo seis) se concentraron en el trimestre JJA. Los gráficos polarplots dan a entender que el sitio de observación sufre de la influencia de fuentes ubicadas en otras regiones en los trimestres restantes, por lo tanto se sugiere también extender este estudio para los periodos faltantes: DEF, MAM, SON. Particularmente, se sugiere extender este análisis al trimestre DEF por ser la estación opuesta a la estudiada, ya que se espera un efecto de las variables meteorológicas locales sobre los contaminantes, diferente o con distinta intensidad a la observada en JJA.

# Bibliografía

- AENOR. (2013). *UNE-EN 14211. Aire Ambiente – Método estándar para la medición de la concentración de dióxido de nitrógeno y monóxido de nitrógeno por quimioluminiscencia*. (In: Report). Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid, España. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0051250>
- Allabakash, S. y Lim, S. (2020). Climatology of planetary boundary layer height-controlling meteorological parameters over the Korean Peninsula. *Remote Sensing*, 12(16), 2571.
- Ambiente, M. (2021). *Decreto 135/021: Reglamento de Calidad de Aire* (Report). Ministerio de Ambiente. Montevideo, Uruguay. [https://medios.presidencia.gub.uy/legal/2021/decretos/05/mamb\\_29.pdf](https://medios.presidencia.gub.uy/legal/2021/decretos/05/mamb_29.pdf)
- Arizmendi, F., Trinchin, R. y Barreiro, M. (2022). Weather Regimes in South America and their impacts over Uruguay. *International Journal of Climatology*.
- Ayala, A., Brauer, M., Mauderly, J. L. y Samet, J. M. (2012). Air pollutants and sources associated with health effects. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 5(2), 151-167.
- Barreiro, M., Arizmendi, F., Díaz, N. y Trinchin, R. (2021). *Análisis de la variabilidad y tendencias observadas de los vientos en Uruguay* (inf. téc.) [CONVENIO PNUD-UDELAR Proyecto URU/18/002: Integración del enfoque de adaptación en ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay]. Dpto. de Ciencias de la Atmósfera (Instituto de Física, Facultad de Ciencias), Instituto Uruguayo de Meteorología.
- Bei, N., Li, G., Huang, R.-J., Cao, J., Meng, N., Feng, T., Liu, S., Zhang, T., Zhang, Q. y Molina, L. T. (2016). Typical synoptic situations and their impacts on the wintertime air pollution in the Guanzhong basin, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(11), 7373-7387.
- Bei, N., Li, G., Zavala, M., Barrera, H., Torres, R., Grutter, M., Gutiérrez, W., García, M., Ruiz-Suarez, L. G., Ortinez, A., Guitierrez, Y., Alvarado, C., Flores, I. y Molina, L. T. (2013). Meteorological overview and plume transport patterns during Cal-Mex 2010. *Atmospheric Environment*, 70, 477-489. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.01.065>

- Carslaw, D. C. y Ropkins, K. (2012). openair — An R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling Software*, 27-28, 52-61. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>
- Cataldo, J., Rezzano, N., D'Angelo, M., Deambrosi, M., Franchi, I., Hill, M. y Fernandez, P. (2019). *Informe Final Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015* (Report). Convenio: IMFIA-FING y MVOTMA. Montevideo, Uruguay. [https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/Inventario\\_de\\_Emisiones\\_Atmosfericas\\_2015.pdf](https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/Inventario_de_Emisiones_Atmosfericas_2015.pdf)
- Chen, R., Samoli, E., Wong, C.-M., Huang, W., Wang, Z., Chen, B., Kan, H., Group, C. C. et al. (2012). Associations between short-term exposure to nitrogen dioxide and mortality in 17 Chinese cities: the China Air Pollution and Health Effects Study (CAPES). *Environment international*, 45, 32-38.
- Chen, T., Kuschner, W., Gokhale, J. y Shofer, S. (2007). Outdoor air pollution: nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and carbon monoxide health effects. *The American journal of the medical sciences*, 333(4), 249-256.
- Crawford, J., Griffiths, A., Cohen, D. D., Jiang, N. y Stelcer, E. (2016). Particulate pollution in the Sydney region: source diagnostics and synoptic controls. *Aerosol and Air Quality Research*, 16, 1055-1066. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>
- de Foy, B., Varela, J. R., Molina, L. T. y Molina, M. J. (2006). Rapid ventilation of the Mexico City basin and regional fate of the urban plume. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(8), 2321-2335. <https://doi.org/10.5194/acp-6-2321-2006>
- de Oliveira, A., Mariano, G., Alonso, M. y Mariano, E. (2016). Analysis of incoming biomass burning aerosol plumes over southern Brazil. *Atmospheric Science Letters*, 17(11), 577-585.
- Dockery, D. W., Pope, C. A., Xu, X., Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., Ferris, B. G. y Speizer, F. E. (1993). An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities [PMID: 8179653]. *New England Journal of Medicine*, 329(24), 1753-1759. <https://doi.org/10.1056/NEJM199312093292401>
- EPA. (2000). *Air Quality Criteria for Carbon Monoxide (Final Report)* (inf. téc.). U.S. Environmental Protection Agency. <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=18163>
- EPA. (2021a). *LIST OF DESIGNATED REFERENCE AND EQUIVALENT METHODS*. Consultado el 11 de octubre de 2021, desde [https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/designated\\_reference\\_and-equivalent\\_methods.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/designated_reference_and-equivalent_methods.pdf)
- EPA. (2021b). *Understanding Global Warming Potentials*. Consultado el 12 de noviembre de 2021, desde <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>

- Faustini, A., Rapp, R. y Forastiere, F. (2014). Nitrogen dioxide and mortality: review and meta-analysis of long-term studies. *European Respiratory Journal*, 44(3), 744-753.
- Fest, S. (2020). El humo de los incendios de Australia llega a Argentina, Chile y Uruguay. *El mundo*. <https://www.elmundo.es/internacional/2020/01/07/5e14cfc5fdddf73908b45e2.html>
- Fortelli, A., Scafetta, N. y Mazzarella, A. (2016). Influence of synoptic and local atmospheric patterns on PM10 air pollution levels: a model application to Naples (Italy). *Atmospheric Environment*, 143, 218-228.
- Freitas, S. R., Longo, K. M., Dias, M. A. S., Dias, P. L. S., Chatfield, R., Prins, E., Artaxo, P., Grell, G. A. y Recuero, F. S. (2005). Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. *Environmental Fluid Mechanics*, 5(1), 135-167.
- Gassmann, M. I. y Mazzeo, N. A. (2000). Air pollution potential: Regional study in Argentina. *Environmental Management*, 25(4), 375-382.
- González-Púmariega, M., Tamayo, M. V. y Sánchez-Lamar, Á. (2009). La radiación ultravioleta. Su efecto dañino y consecuencias para la salud humana. *Theoria*, 18(2), 69-80.
- Han, H., Liu, J., Shu, L., Wang, T. y Yuan, H. (2020). Local and synoptic meteorological influences on daily variability in summertime surface ozone in eastern China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(1), 203-222.
- Han, H., Liu, J., Yuan, H., Jiang, F., Zhu, Y., Wu, Y., Wang, T. y Zhuang, B. (2018). Impacts of synoptic weather patterns and their persistency on free tropospheric carbon monoxide concentrations and outflow in eastern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(13), 7024-7046.
- Haywood, J. y Boucher, O. (2000). Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Reviews of geophysics*, 38(4), 513-543.
- Hegarty, J., Mao, H. y Talbot, R. (2007). Synoptic controls on summertime surface ozone in the northeastern United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D14).
- Hernandez, A., Morales-Rincon, L., Wu, D., Mallia, D., Lin, J. y Jimenez, R. (2019). Transboundary transport of biomass burning aerosols and photochemical pollution in the Orinoco River Basin. *Atmospheric Environment*, 205, 1-8.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D. et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- Holton, J. R. (1973). An introduction to dynamic meteorology. *American Journal of Physics*, 41(5), 752-754.

- Hsu, C. y Cheng, F. (2019). Synoptic weather patterns and associated air pollution in Taiwan. *Aerosol and Air Quality Research*, 19(5), 1139-1151. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.09.0348>
- INE. (2011). *Resultados del Censo de Población 2011: población, crecimiento y estructura por sexo y edad* (Report). Instituto Nacional de Estadística. Uruguay. <https://www.ine.gub.uy/documents/10181/35289/analisispais.pdf>
- Jacobson, M. Z. (2001). Global direct radiative forcing due to multicomponent anthropogenic and natural aerosols. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D2), 1551-1568.
- Jeong, J. I. y Park, R. J. (2013). Effects of the meteorological variability on regional air quality in East Asia. *Atmospheric Environment*, 69, 46-55. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.061>
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J. et al. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American meteorological Society*, 77(3), 437-472.
- Kaufman, Y. J., Tanré, D. y Boucher, O. (2002). A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 419(6903), 215-223.
- Laden, F., Schwartz, J., Speizer, F. E. y Dockery, D. W. (2006). Reduction in fine particulate air pollution and mortality: extended follow-up of the Harvard Six Cities study. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 173(6), 667-672.
- Lamarque, J.-F., Bond, T., Eyring, V., Granier, C., Heil, A., Klimont, Z., Lee, D., Liousse, C., Mieville, A., Owen, B. et al. (2010). Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(15), 7017-7039.
- Lefler, J. S., Higbee, J. D., Burnett, R. T., Ezzati, M., Coleman, N. C., Mann, D. D., Marshall, J. D., Bechle, M., Wang, Y., Robinson, A. L. et al. (2019). Air pollution and mortality in a large, representative US cohort: multiple-pollutant analyses, and spatial and temporal decompositions. *Environmental Health*, 18(1), 1-11.
- Li, Y., Liu, J., Han, H., Zhao, T., Zhang, X., Zhuang, B., Wang, T., Chen, H., Wu, Y. y Li, M. (2019). Collective impacts of biomass burning and synoptic weather on surface PM<sub>2.5</sub> and CO in Northeast China. *Atmospheric environment*, 213, 64-80.
- Liu, S. y Liang, X.-Z. (2010). Observed diurnal cycle climatology of planetary boundary layer height. *Journal of Climate*, 23(21), 5790-5809.
- Lohmann, U. y Feichter, J. (2005). Global indirect aerosol effects: a review. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(3), 715-737.
- Lyapustin, A. y Wang, Y. (2022). MODIS/Terra+Aqua Land Aerosol Optical Depth Daily L2G Global 1km SIN Grid V061 [Data set]. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD19A2.061>

- Mahalakshmi, D., Badarinath, K. y Naidu, C. (2011). Influence of boundary layer dynamics on pollutant concentrations over urban region—A study using ground based measurements. *92.60. Mt; 92.60. Sz*.
- Manahan, S. E. (2022). *Environmental chemistry*. CRC press.
- Manta, G. (2017). *Caracterización de la brisa marina en Uruguay* (Tesis de maestría). Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ciencias - PEDECIBA. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/21451>
- Mao, F., Zang, L., Wang, Z., Pan, Z., Zhu, B. y Gong, W. (2020). Dominant synoptic patterns during wintertime and their impacts on aerosol pollution in Central China. *Atmospheric Research*, 232, 104701.
- Martinez, E. y Díaz de Mera, Y. (2004). *Contaminación Atmosférica*. Universidad de Castilla-La Mancha.
- Martins, L., Hallak, R., Alves, R., de Almeida, D., Squizzato, R., Moreira, C., Beal, A., da Silva, I., Rudke, A. y Martins, J. (2018). Long-range transport of aerosols from biomass burning over southeastern South America and their implications on air quality. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(7), 1734-1745.
- Mazzeo, N. y Venegas, L. (2004). Some aspects of air pollution in Buenos Aires city. *International Journal of Environment and Pollution*, 22(4), 365-378.
- Méndez, J., Pinto-Herrera, L. y Belalcázar-Cerón, L. (2018). Study of a Saharan Dust Intrusion into the Colombian Atmosphere. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 17(32), 17-34.
- MIEM. (2013). *Características del sector Residencial* (Dirección Nacional de Energía, Ministerio de Industria, Energía y Minería). <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/datos-y-estadisticas/estadisticas/encuesta-sobre-consumo-energia-sector-residencial-datos-2013#>
- NCC. (2019). Humo de incendios en la Amazonia llega a Uruguay. *Noticiero Científico y Cultural Iberoamericano*. <https://noticiasncc.com/ciencia/08/27/humo-incendios-amazonia-llega-uruguay/>
- Observador, E. (2021). Velo grisáceo en cielo uruguayo por incendios de campos en Brasil y el resto de Sudamerica. *El Observador*. <https://www.elobservador.com.uy/nota/velo-grisaceo-en-cielo-uruguayo-por-incendios-de-campos-en-brasil-y-el-resto-de-sudamerica-202178132535>
- Observador, E. (2023). Nueva York y las ciudades de la costa este bajo una nube de humo por los incendios de Canadá. *El Observador*. <https://www.elobservador.com.uy/nota/nueva-york-y-las-ciudades-de-la-costa-este-bajo-una-nube-de-humo-por-los-incendios-en-canada-20236881448>
- Oyarzúng, M. (2010). Air pollution an its effects on health. *Revista chilena de enfermedades respiratorias*, 26, 16-25.

- Platt, U. y Stutz, J. (2008). *Differential absorption spectroscopy. Principles and Applications*. Springer.
- Poleo, D. y Briceno-Castillo, J. (2014). The intrusion of Saharan dust in the atmospheric boundary layer of the Caribbean Sea: episode of August 2013. *Tópicos Meteorológicos y Ocean, 2*, 68-89.
- Pope, C. A., Thun, M. J., Namboodiri, M. M., Dockery, D. W., Evans, J. S., Speizer, F. E., Heath, C. W. et al. (1995). Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of US adults. *American journal of respiratory and critical care medicine, 151*(3), 669-674.
- Pope, R., Savage, N., Chipperfield, M., Arnold, S. y Osborn, T. (2014). The influence of synoptic weather regimes on UK air quality: analysis of satellite column NO<sub>2</sub>. *Atmospheric Science Letters, 15*(3), 211-217.
- Pope III, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K. y Thurston, G. D. (2002). Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. *JAMA, 287*(9), 1132-1141. <https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>
- Pope III, C. A., Burnett, R. T., Thurston, G. D., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D. y Godleski, J. J. (2004). Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease. *Circulation, 109*(1), 71-77.
- Raub, J. A., Mathieu-Nolf, M., Hampson, N. B. y Thom, S. R. (2000). Carbon monoxide poisoning—a public health perspective. *Toxicology, 145*(1), 1-14.
- Resquin, M., Santágata, D., Gallardo, L., Gómez, D., Rössler, C. y Dawidowski, L. (2018). Local and remote black carbon sources in the Metropolitan Area of Buenos Aires. *Atmospheric Environment, 182*, 105-114.
- Riaño, D., Ruiz, J. M., Isidoro, D. y Ustin, S. (2007). Spatial and temporal patterns of burned area at global scale between 1981–2000 using NOAA-NASA Pathfinder. *Global Change Biology, 13*, 40-50.
- Rincón-Riveros, J., Rincón-Caro, M., Sullivan, A., Mendez-Espinosa, J., Belalcazar, L., Quirama, M. y Morales, R. (2020). Long-term brown carbon and smoke tracer observations in Bogotá, Colombia: association with medium-range transport of biomass burning plumes. *Atmospheric Chemistry and Physics, 20*(12), 7459-7472.
- Rojas, A. L. P., Borge, R., Mazzeo, N. A., Saurral, R. I., Matarazzo, B. N., Cordero, J. M. y Kropff, E. (2020). High PM<sub>10</sub> concentrations in the city of Buenos Aires and their relationship with meteorological conditions. *Atmospheric Environment, 241*, 117773.
- Rozante, J., Rozante, V., Souza Alvim, D., Ocimar Manzi, A., Barboza Chiquetto, J., Siqueira D'Amelio, M. y Moreira, D. (2017). Variations of carbon monoxide con-

- centrations in the megacity of São Paulo from 2000 to 2015 in different time scales. *Atmosphere*, 8(5), 81.
- Rutllant, J. y Garreaud, R. (1995). Meteorological air pollution potential for Santiago, Chile: towards an objective episode forecasting. *Environmental Monitoring and Assessment*, 34(3), 223-244.
- Salvador, P., Barreiro, M., Gómez-Moreno, F. J., Alonso-Blanco, E. y Artíñano, B. (2021). Synoptic classification of meteorological patterns and their impact on air pollution episodes and new particle formation processes in a south European air basin. *Atmospheric Environment*, 245, 118016.
- Seinfeld, J. y Pandis, S. (2008). *Atmospheric Chemistry and Physics. (2nd ed.) 1997*.
- Shen, L., Mickley, L. y Tai, A. (2015). Influence of synoptic patterns on surface ozone variability over the eastern United States from 1980 to 2012. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(19), 10925-10938.
- Shen, L. y Mickley, L. J. (2017). Seasonal prediction of US summertime ozone using statistical analysis of large scale climate patterns. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(10), 2491-2496.
- Shu, L., Wang, T., Han, H., Xie, M., Chen, P., Li, M. y Wu, H. (2020). Summertime ozone pollution in the Yangtze River Delta of eastern China during 2013–2017: Synoptic impacts and source apportionment. *Environmental Pollution*, 257, 113631.
- Solomon, P., Cowling, E., Hidy, G. y Furiness, C. (2000). Comparison of scientific findings from major ozone field studies in North America and Europe. *Atmospheric Environment*, 34(12), 1885-1920. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00453-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00453-7)
- Spickett, J. T., Brown, H. y Rumchev, K. (2011). Climate change and air quality: the potential impact on health. *Asia Pacific Journal of Public Health*, 23(2\_suppl), 37S-45S.
- Stein, A., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J., Cohen, M. y Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059-2077.
- Stohl, A., Berg, T., Burkhart, J., Fjærraa, A., Forster, C., Herber, A., Hov, Ø., Lunder, C., McMillan, W., Oltmans, S., Shiobara, M., Simpson, D., Solberg, S., Stebel, K., Strøm, J., Tørseth, K., Treffeisen, R., Virkkunen, K. y Yttri, K. (2007). Arctic smoke—record high air pollution levels in the European Arctic due to agricultural fires in Eastern Europe in spring 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(2), 511-534.
- Targino, A., Harrison, R., Krecl, P., Glantz, P., de Lima, C. y Beddows, D. (2019). Surface ozone climatology of South Eastern Brazil and the impact of biomass burning events. *Journal of environmental management*, 252, 109645.

- Targino, A., Krecl, P., Johansson, C., Swietlicki, E., Massling, A., Coraiola, G. y Lihavainen, H. (2013). Deterioration of air quality across Sweden due to transboundary agricultural burning emissions. *Boreal Environment Research*, 18, 19.
- Targino, A. y Krecl, P. (2015). Local and regional contributions to black carbon aerosols in a mid-sized city in southern Brazil. *Aerosol and Air Quality Research*, 16(1), 125-137.
- Thermo. (2004). *Model FH 62-C14 - Operating Instructions*.
- Thermo. (2005a). *Model 42i- Instruction manual*.
- Thermo. (2005b). *Model 48i- Instruction manual*.
- Thishan, K., Kravtsov, S. y Kahl, J. D. (2010). Relationship between synoptic weather disturbances and particulate matter air pollution over the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D24).
- Thomas, M. A. y Devasthale, A. (2014). Sensitivity of free tropospheric carbon monoxide to atmospheric weather states and their persistency: an observational assessment over the Nordic countries. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(21), 11545-11555.
- Townsend, C. y Maynard, R. (2002). Effects on health of prolonged exposure to low concentrations of carbon monoxide. *Occupational and Environmental Medicine*, 59(10), 708-711.
- Turner, M. C., Krewski, D., Pope III, C. A., Chen, Y., Gapstur, S. M. y Thun, M. J. (2011). Long-term ambient fine particulate matter air pollution and lung cancer in a large cohort of never-smokers. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 184(12), 1374-1381.
- Ulke, A. G. (2019). Influence of Regional Transport Mechanisms on the Fingerprint of Biomass-Burning Aerosols in Buenos Aires. *Advances in Meteorology*, 2019. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2019/6792161>
- Ulke, A. G., Longo, K., Freitas, S. y Hierro, R. (2007). Regional pollution due to biomass burning in South America. *Ciência e Natura*, 201-204.
- Ulke, A. G., Longo, K. M. y de Freitas, S. R. (2011). Biomass burning in South America: transport patterns and impacts. *Biomass—detection, production and usage*.
- UNE-EN. (2013). *UNE-EN 14626. Calidad del aire ambiente. Método normalizado para la medición de la concentración de monóxido de carbono por espectroscopía infrarroja no dispersiva*. (In: Report). Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid, España. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?Tipo=N&c=N0051382>
- Unger, N. (2012). Global climate forcing by criteria air pollutants. *Annual Review of Environment and Resources*, 37, 1-24.

- World Health Organization. (2000). *Air quality guidelines for Europe: second edition*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107335>
- World Health Organization. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre: actualización mundial 2005*. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/69478>
- World Health Organization. (2018a). *Calidad del aire y salud*. Consultado el 15 de agosto de 2021, desde [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- World Health Organization. (2018b). *Contaminación Atmosférica y Salud Infantil: prescribir aire limpio: resúmen*. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/275548>
- Xu, D. y Zhu, R. (2000). Atmospheric advective and dispersion nonstatic box-model for prediction of the potential index of airborne pollutant. *QJ Appl. Meteorol*, 11, 2-12.
- Zaror, C. (2002). *Introducción a la ingeniería ambiental para la industria de procesos*. Editorial Universidad de Concepción. <https://books.google.com.uy/books?id=cwYtPwAACAAJ>
- Zeri, M., Oliveira-Júnior, J. F. y Lyra, G. B. (2011). Spatiotemporal analysis of particulate matter, sulfur dioxide and carbon monoxide concentrations over the city of Rio de Janeiro, Brazil. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 113(3), 139-152.
- Zhong, J., Zhang, X., Wang, Y., Wang, J., Shen, X., Zhang, H., Wang, T., Xie, Z., Liu, C., Zhang, H. et al. (2019). The two-way feedback mechanism between unfavorable meteorological conditions and cumulative aerosol pollution in various haze regions of China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(5), 3287-3306.
- Zunckel, M., Saizar, C. y Zarauz, J. (2003). Rainwater composition in northeast Uruguay. *Atmospheric Environment*, 37(12), 1601-1611.