Ingeniería y Gestión Ambiental ParticuoloTech Ltda.

La Concepción 191, Oficina 601, Providencia, Santiago

www.particulas.cl

PARTICULAS
Ingeniería y Gestión Ambiental

SEREMI
Región Metropolitana

Ministerio del
Medio Ambiente

Evaluación del Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire de la RM en la Gestión de Episodios Críticos de Contaminación

Fecha: 25/01/2023

INFORME FINAL

INDIVIDUALIZACIÓN DE LA EMPRESA CONSULTORA

Nombre o Razón Social	Ingeniería y Gestión Ambiental ParticuoloTech Limitada
Nombre de Fantasía	PARTICULAS
RUT	76.398.593-8
Tipo de Empresa	Servicios de Ingeniería
Condición de Nacionalidad	Chilena
Representante Legal	
Nombre	Luis Alonso Díaz Robles
Rut	11.162.556-5
e-mail	luisdiazrobles@particulas.cl
Domicilio Legal en Chile	
Dirección	La Concepción 191, Oficina 601, Providencia
Teléfonos	56 9 79775810
web	www.particulas.cl
e-mail	contacto@particulas.cl

DATOS DE CONTACTO

Nombre	Odel Gallardo Contreras		
Cargo	Gerente Comercial		
e-mail	contacto@particulas.cl		
Fono		Celular 56 9 5322 7950	Fax

Preparado por:

PARTICULAS

Versión del Documento				**2**	
Responsables Elaboración de Informe		***Responsable de revisión de Informe***		***Responsable Revisión y Aprobación de Informe***	
Nombre:	Julio López Pastén	Nombre:	Fidel Vallejo Gallardo	Nombre:	Luis Alonso Díaz Robles
Cargo:	Ingeniero de Proyectos	Cargo:	Gerente de Operaciones	Cargo	Jefe de Proyecto Gerente General Particuolotech Ltda.
Fecha:	25-01-2023	Fecha:	25-01-2023	Fecha:	25-01-2023
Nombre:	Ariel Meza Molina				
Cargo:	Ingeniero de Proyectos				
Fecha:	25-01-2023				

CONTENIDO

CONTENIDO 4

ÍNDICE DE TABLAS 5

ÍNDICE DE FIGURAS 6

1.- RESUMEN EJECUTIVO 10

2.- INTRODUCCIÓN 11

3.- OBJETIVOS 13

3.1.- OBJETIVO GENERAL 13

3.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS 13

4.- METODOLOGÍA 15

4.1.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE FACTORES METEOROLÓGICOS QUE INFLUYEN EN EL DESARROLLO DE EPISODIOS CRÍTICOS EN LA RM 15

4.1.1.- ESTADO DEL ARTE EN FACTORES QUE INFLUYEN EN LA OCURRENCIA DE EPISODIOS CRÍTICOS 18

4.2.- PROCEDIMIENTOS SEREMI MA RM PARA LA REALIZACIÓN DE PRONÓSTICO DE CALIDAD DEL AIRE 22

4.2.1.- DIAGRAMA DE FLUJO 22

4.2.2.- DESCRIPCIÓN PROCEDIMIENTOS 23

4.3.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE VARIABLES METEOROLÓGICAS Y DE CALIDAD DEL AIRE RED MACAM 29

4.3.1.- SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA ENTRE VARIABLES 32

4.3.2.- MODELOS ADITIVOS GENERALIZADOS (GAM) 36

4.3.3.- EFECTO DE LA INVERSIÓN TÉRMICA 40

4.3.4.- ANÁLISIS DEL EFECTO MÚLTIPLE DE VARIABLES METEOROLÓGICAS 44

4.3.5.- EFECTO DE LA DIRECCIÓN DEL VIENTO 45

4.4.- ACTIVIDADES ANTRÓPICAS QUE CONTRIBUYEN EN LA OCURRENCIA DE EPISODIOS CRÍTICOS 49

4.4.1.- ANÁLISIS ESTACIONALES 50

4.5.- EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE PRONÓSTICO DE CALIDAD DEL AIRE 53

4.5.1.- TABLAS DE CONTINGENCIA CON RESÚMENES DE PRONÓSTICO DE CALIDAD DEL AIRE PARA MODELO CASSMASSI 1, MP10 53
4.5.2.- TABLAS DE CONTINGENCIA CON RESÚMENES DE PRONÓSTICO DE CALIDAD DEL AIRE PARA MODELO WRF, MP2.5 57
4.6.- ANÁLISIS DE EPISODIOS CRÍTICOS NO DECLARADOS 61
4.6.1.- EVENTOS CRÍTICOS NO DECLARADOS MP10 64
4.6.2.- EVENTOS NO DECLARADOS MP2.5 65
4.7.- PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE CALIDAD DEL AIRE 75
5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 76
6.- REFERENCIAS 78
APÉNDICE 79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Niveles de media móvil de 24 horas de material particulado que determinan los episodios críticos de contaminación, según normativa chilena. 11
Tabla 2: Factores meteorológicos que influyen en el desarrollo de episodios críticos en la Zona Central de Chile, en particular en la Región Metropolitana. 15
Tabla 3: Porcentaje de data perdida de variables meteorológicas en estaciones de la red MACAM (Fuente: SINCA). 29
Tabla 4: Número de episodios críticos constatados en Santiago por mes, MP2.5. 31
Tabla 5: Número de episodios críticos constatados en Santiago por día, MP2.5. 49
Tabla 6: Evaluación de la condición relevante considerando Modelo Cassmassi Oficial (MP10), año 2020. 53
Tabla 7: Evaluación por ocurrencia de episodio crítico considerando Modelo Cassmassi Oficial (MP10), año 2020. 54
Tabla 8: Evaluación de la condición relevante considerando Modelo Cassmassi Oficial (MP10), año 2021. 54
Tabla 9: Evaluación por ocurrencia de episodio crítico considerando Modelo Cassmassi Oficial (MP10), año 2021. 55
Tabla 10: Evaluación de la condición relevante considerando Modelo Cassmassi Oficial (MP10), año 2022. 55
Tabla 11: Evaluación por ocurrencia de episodio crítico considerando Modelo Cassmassi Oficial (MP10), año 2022. 56
Tabla 12: Porcentaje de acierto por mes Modelo Cassmassi Oficial (MP10). 56

Tabla 13: Porcentaje de acierto por día Modelo Cassmassi Oficial (MP10). 57
Tabla 14: Evaluación de la condición relevante considerando Modelo WRF Oficial (MP2.5), año 2020. 57
Tabla 15: Evaluación por ocurrencia de episodio crítico considerando Modelo WRF Oficial (MP2.5), año 2020. 58
Tabla 16: Evaluación de la condición relevante considerando Modelo WRF Oficial (MP2.5), año 2021. 58
Tabla 17: Evaluación por ocurrencia de episodio crítico considerando Modelo WRF Oficial (MP2.5), año 2021. 59
Tabla 18: Evaluación de la condición relevante considerando Modelo WRF Oficial (MP2.5), año 2022. 59
Tabla 19: Evaluación por ocurrencia de episodio crítico considerando Modelo WRF Oficial (MP2.5), año 2022. 60
Tabla 20: Porcentaje de acierto por mes Modelo WRF Oficial (MP2.5). 60
Tabla 21: Porcentaje de acierto por día Modelo WRF Oficial (MP2.5). 61
Tabla 22: Eventos No Declarados clasificados por año y contaminante. 63
Tabla 23: Rango de Temperatura y Porcentaje de humedad relativa en días previos a episodios no declarados. 73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estaciones de monitoreo de calidad del aire red MACAM (amarillo) y estaciones DMC (rojo). (Fuente: Elaboración propia). 12
Figura 2: Evolución de promedios mensuales de MP2.5 y MP10. Estaciones históricas red MACAM, mediciones con dicótomo, 1988 a 2007 (Alvarado, 2010). 19
Figura 3: Factores MP2.5 para variables derivadas de velocidad del viento, temperatura y humedad relativa. Si los factores multiplicativos son mayores que uno, contribuyen a un aumento en el material particulado, y viceversa (Yáñez et al., 2017). 21
Figura 4: Diagrama de flujo de los procedimientos llevados a cabo por la SEREMI MA de la RM para realizar el pronóstico de calidad del aire. 22
Figura 5: Ejemplo de la sección “Condición de calidad del aire” de la minuta interna GEC. ... 23
Figura 6: Ejemplo de la sección “Pronóstico-Modelos” de la minuta interna GEC. 24
Figura 7: Ejemplos de gráficos de retrodispersión en altura de distintos aerosoles. 25
Figura 8: Ejemplo de “Halcón Parquemet”. 26
Figura 9: Ejemplo de mapa de presiones en altura. 27
Figura 10: Ejemplo de la sección “Análisis y Proyección Futura” de la minuta interna GEC. .. 27
Figura 11: Ejemplo de la sección “Estadística Episodios” de la minuta interna GEC. 28
Figura 12: Episodios constatados de MP10 por año. 30
Figura 13: Episodios constatados de MP2.5 por año. 30

Figura 14: Coeficientes de correlación para estación Independencia. 32
Figura 15: Coeficientes de correlación para estación Cerro Navia. 33
Figura 16: Coeficientes de correlación para estación Pudahuel. 34
Figura 17: Coeficientes de correlación para estación El Bosque..... 35
Figura 18: Modelos Aditivos Generalizados entre MP10 y variables meteorológicas, estación Cerro Navia. 36
Figura 19: Modelos Aditivos Generalizados entre MP2.5 y variables meteorológicas, estación Independencia. 36
Figura 20: Modelos Aditivos Generalizados entre MP2.5 y variables meteorológicas, estación Pudahuel. 37
Figura 21: Modelos Aditivos Generalizados entre MP2.5 y variables meteorológicas, estación El Bosque. 37
Figura 22: MP10 promedio horario (azul) en días con humedad relativa mayor (verde) y menor al 65% (rojo) en estación Independencia, año 2019. 38
Figura 23: MP2.5 promedio horario (azul) en días con humedad relativa mayor (verde) y menor al 70% (rojo) en estación Cerro Navia, año 2019. 39
Figura 24: MP2.5 promedio horario (azul) en días con humedad relativa mayor (verde) y menor al 70% (rojo) en estación Pudahuel, año 2021. 39
Figura 25: MP10 promedio horario (azul) en días con (rojo) y sin inversión térmica (verde) entre estaciones Lo Prado y San Pablo, año 2019. 40
Figura 26: MP2.5 promedio horario (azul) en días con (rojo) y sin inversión térmica (verde) entre estaciones Lo Prado y Quinta Normal, año 2019. 41
Figura 27: MP10 promedio horario (azul) en días con (rojo) y sin inversión térmica (verde) entre estaciones Lo Prado y San Pablo, año 2020. 41
Figura 28: MP10 promedio horario (azul) en días con (rojo) y sin inversión térmica (verde) entre estaciones Lo Prado y San Pablo, año 2021. 42
Figura 29: MP2.5 promedio horario (azul) en días con (rojo) y sin inversión térmica (verde) entre estaciones Lo Prado y Quinta Normal, año 2021. 42
Figura 30: MP10 promedio horario (azul) en días con (rojo) y sin inversión térmica (verde) entre estaciones Lo Prado y San Pablo, año 2022. 43
Figura 31: MP2.5 promedio móvil de 24 horas en función del rango de temperatura y coloreado por niveles de humedad relativa mínima, estación Cerro Navia. 44
Figura 32: MP10 promedio en función de la diferencia de temperatura entre estaciones Lo Prado y San Pablo y coloreado por niveles de humedad relativa, estación Cerro Navia. 45
Figura 33: Gráficos polares de MP2.5 en función de la velocidad del viento de 2017 a 2022, estación Parque O'Higgins. 45
Figura 34: Gráficos polares de MP2.5 en función de la velocidad del viento de 2017 a 2022, estación Cerro Navia..... 46
Figura 35: Efecto de la velocidad y dirección del viento durante Alerta de MP10 y Preemergencia de MP2.5 en estación Pudahuel, ... 46

Figura 36: Efecto de la velocidad y dirección del viento durante Preemergencia en estación Cerro Navia, ... 47
Figura 37: Efecto de la velocidad y dirección del viento durante Alerta de MP10 y Preemergencia de MP2.5 en estación El Bosque, ... 47
Figura 38: Efecto de la velocidad y dirección del viento durante Preemergencia en estación Parque O'Higgins, ... 48
Figura 39: MP10 (rojo) y MP2.5 (celeste) promedio 24 h por mes (izq.), promedio 24 h diario (centro) y horario (der.), estación Las Condes. 50
Figura 40: MP10 (rojo) y MP2.5 (celeste) promedio 24 h por mes (izq.), promedio 24 h diario (centro) y horario (der.), estación Parque O'Higgins. 50
Figura 41: MP10 MP10 (rojo) y MP2.5 (celeste) promedio 24 h por mes (izq.), promedio 24 h diario (centro) y horario (der.), estación Pudahuel. 51
Figura 42: MP10 (rojo) y MP2.5 (celeste) promedio 24 h por mes (izq.), promedio 24 h diario (centro) y horario (der.), estación El Bosque. 51
Figura 43: MP10 (rojo) y MP2.5 (celeste) promedio 24 h por mes (izq.), promedio 24 h diario (centro) y horario (der.), estación Cerro Navia. 52
Figura 44: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia día 10-07-2021 y Preemergencia 11-07-2021. 62
Figura 45: Porcentaje de humedad relativa y concentración de MP10 en Cerro Navia día 10-07-2021 y Preemergencia 11-07-2021. 62
Figura 46: Porcentaje de humedad relativa y concentración de MP2.5 día 10-07-2021 y Preemergencia 11-07-2021. 63
Figura 47: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia entre los días 28-06-2022 y 29-06-2022. 64
Figura 48: Porcentaje de humedad relativa en Cerro Navia entre los días 28-06-2022 y 29-06-2022. 65
Figura 49: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia entre los días 26-06-2020 y 27-06-2020. 66
Figura 50: Porcentaje de humedad relativa en Cerro Navia entre los días 26-06-2020 y 27-06-2020. 66
Figura 51: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia entre los días 22-07-2020 y 23-07-2020. 67
Figura 52: Porcentaje de humedad relativa en Cerro Navia entre los días 22-07-2020 y 23-07-2020. 67
Figura 53: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia entre los días 24-07-2020 y 25-07-2020. 68
Figura 54: Porcentaje de humedad relativa en Cerro Navia entre los días 24-07-2020 y 25-07-2020. 68
Figura 55: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia entre los días 18-06-2021 y 19-06-2021. 69

Figura 56: Porcentaje de humedad relativa en Cerro Navia entre los días 18-06-2020 y 19-06-2020. 69
Figura 57: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia entre los días 12-07-2021 y 13-07-2021. 70
Figura 58: Porcentaje de humedad relativa en Cerro Navia entre los días 12-07-2021 y 13-07-2021. 70
Figura 59: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia entre los días 05-08-2021 y 06-08-2021. 71
Figura 60: Porcentaje de humedad relativa en Cerro Navia entre los días 05-08-2021 y 06-08-2021. 71
Figura 61: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia entre los días 12-08-2021 y 13-08-2021. 72
Figura 62: Porcentaje de humedad relativa en Cerro Navia entre los días 12-08-2021 y 13-08-2021. 72
Figura 63: MP2.5 promedio móvil coloreado por niveles del rango de temperatura en estación Cerro Navia, año 2021. 73
Figura 64: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia entre los días 23-07-2022 y 24-07-2022. 74
Figura 65: Porcentaje de humedad relativa en Cerro Navia entre los días 23-07-2022 y 24-07-2022. 74
Figura 66: Propuesta de metodología de pronóstico de calidad del aire. 75

1.- RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento detalla los resultados finales alcanzados para la evaluación del sistema de Gestión de Episodios Críticos en la Región Metropolitana entre los meses de mayo a agosto de cada año. Se realizó una revisión a profundidad del actual sistema para identificar brechas y mejoras factibles de aplicarse en función de la data disponible.

Los principales resultados de esta evaluación destacan que respecto a la red MACAM, las estaciones de Pudahuel y Cerro Navia, ubicadas en zonas de menor altitud de la ciudad, son las que concentraron la mayor ocurrencia de episodios de MP10 y MP2.5. Asimismo, se pudo apreciar que los fines de semana y lunes concentraron el 45.3% y 16.9% respectivamente de la ocurrencia de episodios ocurridos en la ciudad, cuyo origen se debe a efectos antrópicos como la combustión de leña en hogares o a emisiones de gases por parte de vehículos.

Además, durante el mes de julio se observaron los niveles más altos de MP2.5, coincidiendo con la presencia de las temperaturas más bajas en la ciudad durante ese periodo. Así, los efectos del tráfico vehicular y calefacción domiciliaria, junto con la menor ventilación y la presencia de inversión térmica durante el invierno en Santiago, pueden aumentar la concentración de material particulado. También se pudo apreciar que la variable con mayor significancia estadística es la magnitud de la velocidad del viento promedio, que presenta una relación inversamente proporcional con la concentración promedio de MP10 y MP2.5. Bajo esta misma idea, se puede observar cómo a medida que aumenta el rango de temperatura también lo hace la concentración de MP2.5, mientras que la humedad relativa desciende.

En relación con los modelos de pronósticos de calidad del aire entre los años 2020 y 2022, se pudo observar que el modelo Cassmassi 1 para MP10 predijo de mayor acierto durante la ocurrencia de no episodios, sin embargo, tuvo un 0% de acierto en Preemergencias. También, se pudo apreciar una tendencia a sobre estimar del modelo evidenciado en que más del 60% de los episodios predichos en cada año fueron falsas alarmas. Por otro lado, el modelo WRF para MP2.5 predijo de mejor manera la ocurrencia de no episodios con respecto a la ocurrencia de episodios, sin embargo, tuvo un acierto total mayor al 70% en la predicción de estos y los episodios no alertados entre estos tres años son menores al 27%.

Finalmente, un análisis de contaminantes realizado en el día previo y en aquellos de Eventos Críticos No Declarados mostró que, para MP10 y MP2.5, es recomendable incluir en los modelos de pronóstico las variables de velocidad de viento, porcentaje de humedad relativa y rango de temperatura mínima y máxima de las 24 h anteriores para predecir futuros eventos críticos.

2.- INTRODUCCIÓN

La Gestión de Episodios Críticos (GEC), que rige desde el 1 de mayo al 31 de agosto de cada año, forma parte del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) para la Región Metropolitana de Santiago, cuyo objetivo es dar cumplimiento a las Normas Primarias de Calidad Ambiental de Aire vigentes, como se puede apreciar en la Tabla 1, asociados a contaminantes como el Material Particulado Respirable (MP10), Material Particulado Fino Respirable (MP2.5), Ozono (O_3) y Monóxido de Carbono (CO).

Tabla 1: Niveles de media móvil de 24 horas de material particulado que determinan los episodios críticos de contaminación, según normativa chilena.

Nivel	DS N°59, de 1998, MP10, $[\mu g/m^3 N\ 24h]$	DS N°12, de 2022, MP10, $[\mu g/m^3 N\ 24h]$	MP2.5, $[\mu g/m^3 N\ 24h]$
ALERTA	195-239	180-229	80-109
PREEMERGENCIA	240-329	230-329	110-169
EMERGENCIA	330 o superior	330 o superior	170 o superior

Durante los meses de invierno, en la Región Metropolitana ocurren episodios de alta contaminación, debido a la combinación de las malas condiciones de ventilación, y el aumento de las emisiones de contaminantes. El anticiclón subtropical del Pacífico suroriental (SE) ejerce su influencia en esta región durante casi todo el año, resultando en una persistente inversión térmica de subsidencia y un clima semiárido, con precipitaciones anuales cercanas a los 300 mm concentradas en los meses de invierno (Garreaud & Rutllant, 2006; Morales, 2006). La inversión térmica es común la cuenca de Santiago y puede explicar de manera directa los mayores niveles de polución durante la temporada fría por el limitado desarrollo de la capa de mezcla y las débiles magnitudes de velocidad del viento en su interior, lo que tiene como resultado una baja capacidad de dispersión (Yáñez et al., 2017).

De esta manera, el objetivo del Plan Operacional para la Gestión de Episodios Críticos (GEC), es enfrentar los episodios críticos de contaminación atmosférica por MP2.5 y MP10 en la Región Metropolitana. Este Plan Operacional se estructura a partir de componentes como un Sistema de Seguimiento de calidad del aire, el cual corresponde a la Red de Monitoreo en línea de la calidad del aire de las estaciones indicadas en la Figura 1, un sistema de pronóstico de los niveles de calidad del aire en la región, medidas permanentes y de episodios críticos, entre otros.

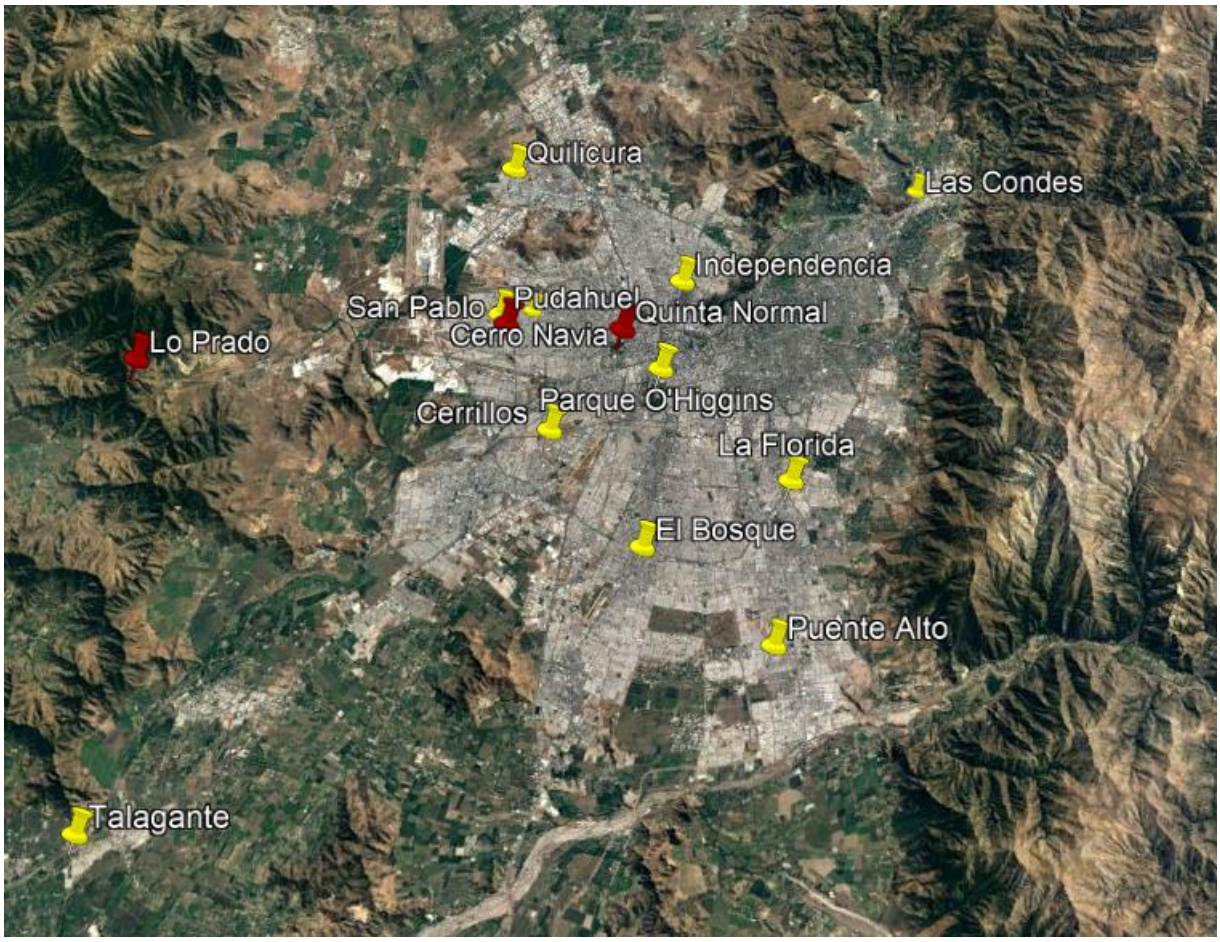

Figura 1: Estaciones de monitoreo de calidad del aire red MACAM (amarillo) y estaciones DMC (rojo). (Fuente: Elaboración propia).

Con motivo de mejorar los protocolos y actividades que se realizan para efectuar el pronóstico de calidad del aire, en particular para los episodios críticos de MP2.5, es que se realiza el presente estudio, llevando a cabo distintas actividades como recopilar, analizar y sistematizar estudios sobre los factores meteorológicos que influyen en el desarrollo de episodios críticos en la Región Metropolitana, estudiar y analizar los procedimientos llevados a cabo por el área de Calidad del Aire y Cambio Climático de la SEREMI MA RM para realizar el pronóstico, seguido del establecimiento de una relación para los períodos GEC de los años 2017 a 2022 entre la ocurrencia de episodios críticos registrados en las distintas estaciones de calidad del aire de la red MACAM y las variables meteorológicas de distintas estaciones, sumando al análisis las posibles actividades antrópicas relacionadas al transporte y quema de leña. Entre otras actividades realizadas se tiene la evaluación de la asertividad de los modelos de calidad del aire utilizados para hacer los pronósticos, además de analizar los casos en que se constataron episodios críticos que no fueron declarados.

Finalmente, en la sección de Apéndice se presenta un vínculo para acceder a un material de difusión sobre los procesos meteorológicos y antrópicos involucrados en el desarrollo de episodios críticos de contaminación en la Región Metropolitana.

3.- OBJETIVOS

3.1.- OBJETIVO GENERAL

Evaluar y proponer mejoras al Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire del Plan Operacional de Gestión de Episodios Críticos de la Región Metropolitana.

3.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. **Estudiar, analizar y proponer mejoras al Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire de la Región Metropolitana, en particular para los episodios críticos de MP2.5.**

a) Recopilar, analizar y sistematizar como mínimo 5 estudios o publicaciones sobre los factores meteorológicos que influyen en el desarrollo de episodios críticos en la Zona Central de Chile, en particular en la Región Metropolitana.

b) Estudiar y analizar, para luego plasmar en un documento descriptivo los procedimientos llevados a cabo por el área de Calidad del Aire y Cambio Climático de la SEREMI MA RM para realizar el Pronóstico de Calidad del Aire.

c) Establecer una relación para los períodos GEC de los años 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 y 2022 entre la ocurrencia de episodios críticos registrados en las distintas estaciones de calidad del aire de la red MACAM y las variables meteorológicas de distintas estaciones.

d) Sumar al análisis anterior las posibles actividades antrópicas relacionadas al transporte y quema de leña, asociada a fines de semana, feriados, en particular en horario nocturno.

e) Analizar el comportamiento y la asertividad de los modelos de calidad del aire utilizados para hacer los pronósticos, en particular en los días de episodios críticos, y evaluar la importancia que hay que darles al momento de hacer el pronóstico. Incluir en el análisis los distintos meses y días de la semana.

f) Analizar en los períodos GEC del 2017 al 2022, ambos años inclusive, los casos en que se constataron episodios críticos que no fueron declarados, y determinar qué

elementos o variables debieron considerarse con mayor relevancia para realizar el pronóstico de forma correcta.

g) Plasmar en un documento una propuesta de metodología de pronóstico de calidad del aire, que contenga los aprendizajes de las actividades anteriores.

2. Generar información detallada y clara sobre los procesos meteorológicos y antrópicos involucrados en el desarrollo de episodios críticos de contaminación en la Región Metropolitana, orientada a la ciudadanía en general.

a) Desarrollar material informativo en base a los resultados obtenidos con respecto al objetivo 1.

4.- METODOLOGÍA

En esta sección se detallan los resultados alcanzados para el Objetivo 1. El material de difusión generado para el Objetivo 2, se encuentra en el Apéndice.

4.1.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE FACTORES METEOROLÓGICOS QUE INFLUYEN EN EL DESARROLLO DE EPISODIOS CRÍTICOS EN LA RM

En la Tabla 2 se presentan los estudios analizados sobre los factores meteorológicos que influyen en la ocurrencia de episodios críticos en la Región Metropolitana.

Tabla 2: Factores meteorológicos que influyen en el desarrollo de episodios críticos en la Zona Central de Chile, en particular en la Región Metropolitana.

Nombre Estudio	Autores	Factores Meteorológicos Abordados	Contaminantes Estudio	Principales Conclusiones y Aportes
Analysis of PM10, PM2.5, and PM2.5-10 Concentrations in Santiago, Chile, from 1989 to 2001	Koutrakis et al., 2005	Velocidad del viento, temperatura y humedad relativa.	MP10, MP2.5 y MP2.5-10	Los niveles de contaminación disminuyen cuando aumenta la velocidad del viento.
Influence of Surface and subsidence thermal inversion on PM2.5 and black carbon concentration	Gramsch et al., 2014	Temperatura	MP2.5, hollín	- MP2.5 siempre es mayor en días con inversión térmica. - Se necesitan mediciones de temperatura en función de la altura para correlacionar la inversión con MP2.5.
Urban airborne matter in central and southern Chile: Effects of meteorological conditions on fine and coarse particulate matter	Yáñez et al., 2017	Velocidad media del viento, temperatura mínima y humedad relativa	MP10, MP2.5 y MP2.5-10	- Relación inversamente proporcional entre velocidad media del viento y MP2.5 y grueso. - Relación inversamente proporcional entre temperatura mínima y MP2.5. - La concentración de MP2.5 y grueso se ven incrementadas cuando la humedad relativa es menor al 65%.

Tabla 2: Factores meteorológicos que influyen en el desarrollo de episodios críticos en la Zona Central de Chile, en particular en la Región Metropolitana (continuación).

Nombre Estudio	Autores	Factores Meteorológicos Abordados	Contaminantes Estudio	Principales Conclusiones y Aportes
Factores Meteorológicos de la Contaminación Atmosférica en Santiago	Garreaud y Rutllant, 2006	Grado de estabilidad atmosférica cerca de la superficie en el periodo nocturno y el desarrollo de la capa de mezcla y los vientos en su interior en el periodo diurno.	MP10	- La ventilación y los niveles de contaminación mejoran durante el paso de vaguadas en altura y sistemas frontales (aumento de la magnitud viento y precipitaciones). - El incremento de la estabilidad atmosférica que resulta de la inversión térmica lleva a un mínimo la ventilación (asociación entre bajas costeras y episodios críticos de contaminación).
Estudio Integrado de Factores que Influyen sobre la Contaminación Atmosférica por Material Particulado Respirable de Pudahuel	Alvarado, 2010	Velocidad y dirección de vientos y variabilidad de escala sinóptica (configuración tipo A y BPF)	MP10	La velocidad del viento en Pudahuel tiene un patrón de comportamiento distinto al resto de las estaciones durante episodios de tipo A, el que favorece el aumento de las concentraciones e impide la dispersión de las emisiones desde las fuentes cercanas (velocidades muy bajas durante las horas de mayor concentración).

Tabla 2: Factores meteorológicos que influyen en el desarrollo de episodios críticos en la Zona Central de Chile, en particular en la Región Metropolitana (continuación).

Nombre Estudio	Autores	Factores Meteorológicos Abordados	Contaminantes Estudio	Principales Conclusiones y Aportes
Metodología práctica para determinar el PMCA en pronósticos operativos de calidad del aire para la Región Metropolitana	Abarca y Hidalgo, 2019	Dispersión vertical (temperatura), dispersión horizontal (velocidad y dirección del viento) y variabilidad de escala sinóptica (configuración tipo A y BPF)	MP10 y MP2.5	En los días con episodios de MP2.5 que no presentaron una configuración tipo A o BPF, no se observaron patrones sinópticos claros de identificar. Sin embargo, una configuración meteorológica de escala sinóptica que sí se pudo distinguir, fue una que vincula altas presiones asociadas a una masa de aire de origen polar (en superficie) con la presencia o paso de una vaguada en altura (500 hPa).

4.1.1.- ESTADO DEL ARTE EN FACTORES QUE INFLUYEN EN LA OCURRENCIA DE EPISODIOS CRÍTICOS

A continuación, se presenta un resumen sobre los factores meteorológicos que influyen en el desarrollo de episodios críticos en la región Metropolitana.

La cuenca de Santiago se ubica en el borde occidental de Sudamérica subtropical, inmediatamente al oeste de la cordillera de los Andes, y a unos 100 km de la costa, separada de esta por una cadena de cerros. En estas latitudes, la altura promedio de los Andes supera los 4500 msnm y presenta una interrupción de unos 50 km de ancho por donde drena el río Maipo. La cuenca es parcialmente confinada hacia el norte y el sur por cadenas montañosas transversales. El área metropolitana actual se ubica sobre un sector de suave pendiente dentro de la cuenca, con elevaciones crecientes en el eje oeste-este de 450 a 700 msnm aproximadamente (Morales, 2006).

El anticiclón subtropical del Pacífico suroriental (SE) ejerce su influencia en esta región durante casi todo el año, resultando en una persistente inversión térmica de subsidencia y un clima semiárido, con precipitaciones anuales cercanas a los 300 mm concentradas en los meses de invierno (Garreaud & Rutllant, 2006; Morales, 2006). La inversión térmica es común en el valle central de Chile y puede explicar bien los mayores niveles de polución durante los meses fríos por el limitado desarrollo de la capa de mezcla y el débil viento en su interior (Yáñez et al., 2017).

FACTORES METEOROLÓGICOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN SANTIAGO

Estos factores climatológicos, desfavorables para la dispersión de contaminantes, sumados al confinamiento geográfico de la ciudad y los altos niveles de emisión de contaminantes antrópicos, hacen de Santiago una de las ciudades más contaminadas del continente por partículas en suspensión y gases durante el semestre invernal. Durante los meses de verano, el mayor calentamiento superficial permite romper la inversión térmica sobre la cuenca en horas de la tarde, mejorando significativamente la ventilación de la ciudad (Garreaud & Rutllant, 2006). Lo anterior se ve reflejado en que durante los meses de primavera-verano los promedios mensuales de MP10 y MP2.5 son mucho menores que los registrados en meses de otoño-invierno, con días fríos y escasa ventilación, como se muestra en la Figura 2.

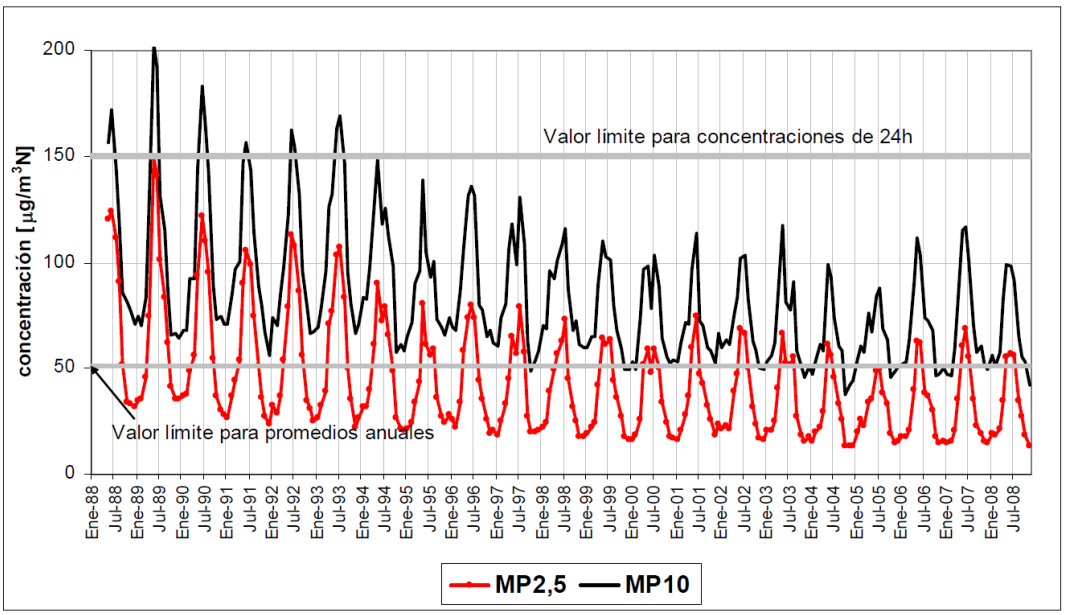

Figura 2: Evolución de promedios mensuales de MP2.5 y MP10. Estaciones históricas red MACAM, mediciones con dicótomo, 1988 a 2007 (Alvarado, 2010).

Como se mencionó anteriormente, uno de los factores que ayuda a evitar episodios críticos de contaminación corresponde a la ventilación de la cuenca de Santiago. Esta permanece bien ventilada cuando el número de días entre el paso del eje de una vaguada y el siguiente se reduce significativamente, por lo que el calentamiento por subsidencia no alcanza a producir una baja costera y la cuenca permanece bien ventilada durante el breve periodo postfrontal. En otros casos, la dorsal cálida en altura sobre el Pacifico y el anticiclón en superficie sobre la zona sur y austral persisten por una semana o más, lo que define un bloqueo atmosférico. La persistencia de la baja costera sobre Chile central y la mala ventilación asociada, producen condiciones críticas de contaminación atmosférica en Santiago debido a la acumulación de contaminantes en la cuenca (Garreaud & Rutllant, 2006).

Otras variantes del caso típico descrito anteriormente son producto de cambios en la intensidad del forzante de gran escala. Una vez que el eje de la vaguada en altura se desplaza al este de los Andes puede establecerse, en vez de una dorsal, una condición de flujo esencialmente zonal en la tropósfera media sobre Chile central y el Pacífico adyacente, con una reducida advección de vorticidad anticiclónica. Así, el anticiclón postfrontal en superficie resulta débil, las presiones a lo largo de la costa no aumentan marcadamente hacia el sur y consecuentemente el viento del este en niveles bajos al oeste de los Andes subtropicales es muy débil o ausente. En estas condiciones, no existe un reforzamiento significativo de la subsidencia cerca de la topografía, no se forma una baja costera y la ventilación de la cuenca puede mantenerse sin cambios importantes (Garreaud & Rutllant, 2006).

La situación opuesta a lo anterior ocurre cuando la dorsal en altura es muy marcada, asociada a un intenso anticiclón en superficie desplazándose hacia la costa chilena. Existen casos en que el eje dorsal en altura presenta una inclinación NO-SE muy pronunciada produciendo vientos con componente del este sobre los Andes subtropicales que refuerza la subsidencia sobre la ladera andina (efecto Foehn). En estas condiciones, el calentamiento en torno a la altura del tope de la inversión es muy intenso y la baja costera muy profunda, produciendo algunos de los episodios más críticos de contaminación en Santiago (Garreaud & Rutllant, 2006).

Otra variante ocurre cuando el sistema frontal que se aproxima a la zona central de Chile es débil y se mantiene estacionario sobre la zona sur del país y el Pacifico adyacente, sin producir lluvias ni un aumento significativo de la velocidad del viento sobre Santiago. Estos factores, combinados con un limitado desarrollo de la capa de mezcla producto de la disminución de la radiación solar por la nubosidad media y alta, mantienen una pobre ventilación de la cuenca y una mala calidad del aire de Santiago varios días después de que la baja costera ha culminado, esta condición parece ser más recurrente durante los inviernos de los años de la niña, y cerca de un tercio de los episodios críticos de contaminación atmosférica ocurren bajo esta configuración (Garreaud & Rutllant, 2006).

EFECTO DE LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS SOBRE EL MATERIAL PARTICULADO FINO Y GRUESO EN LAS ÁREAS URBANAS DE LA ZONA CENTRAL DE CHILE

En Chile, existe poca información que trate sobre la relación entre variables meteorológicas y material particulado. Existen algunos estudios al respecto en la Región Metropolitana, como el conducido por Gramsch et al. (2014), en el cual no se encontró una dependencia lineal entre el MP2.5 y variables meteorológicas como velocidad media, temperatura de superficie y humedad relativa. Sin embargo, la data sí demostró de forma cualitativa que en los días con inversión térmica la concentración de contaminantes es mayor que en los días sin inversión. Además, se concluyó que usar mediciones continuas de temperatura a alturas limitadas no es suficiente para encontrar una correlación significativa entre la inversión térmica y el MP2.5. Cuando se dispone de datos de temperatura en función de la altura se encuentra una correlación moderada, lo que indica que se necesita el perfil de temperatura vertical completo para encontrar una relación entre esas variables, siendo necesario además muestrear una gran masa de aire.

Koutrakis et al. (2005), reportaron un efecto significativo de la velocidad del viento, y un menor efecto de la temperatura y humedad relativa. En general, se encontró que las medias diarias de las variables meteorológicas no son un buen predictor para el material particulado, a excepción de la velocidad media del viento. La discrepancia en los resultados entre los distintos estudios existentes puede atribuirse principalmente a las diferencias en las

metodologías (regresiones lineales entre las variables, relaciones no lineales, etc.) (Yáñez et al., 2017).

Respecto a la velocidad media del viento en Santiago, Yáñez et al. (2017) en su estudio demostraron de manera consistente que existe una relación inversamente proporcional con el material particulado 2.5 y grueso, lo que puede estar asociado con el efecto de dilución durante los meses de invierno.

El segundo efecto más importante de este estudio corresponde a la temperatura mínima y, al igual que la velocidad media del viento, tiene una relación inversamente proporcional con la concentración de material particulado. Se ha encontrado que bajas temperaturas mantienen la capa de mezcla cerca del suelo y viceversa, lo cual afecta la dispersión de contaminantes. De este modo, una variación de temperatura mayor en el día durante los meses de invierno puede incrementar la inversión térmica (evaluada por el rango de temperatura), lo que afecta de manera negativa la dispersión de material particulado.

La humedad relativa presenta un efecto significativo en el material particulado. Esta variable está asociada de manera directa con el vapor de agua disponible en la atmósfera, y afecta el proceso de crecimiento e hidratación de las partículas. Se encontró que la concentración de material particulado 2.5 y grueso se ven incrementadas cuando la humedad relativa era menor al 65% (Yáñez et al., 2017).

En la Figura 3 se pueden apreciar los factores MP2.5 para variables derivadas de velocidad del viento, temperatura y humedad relativa.

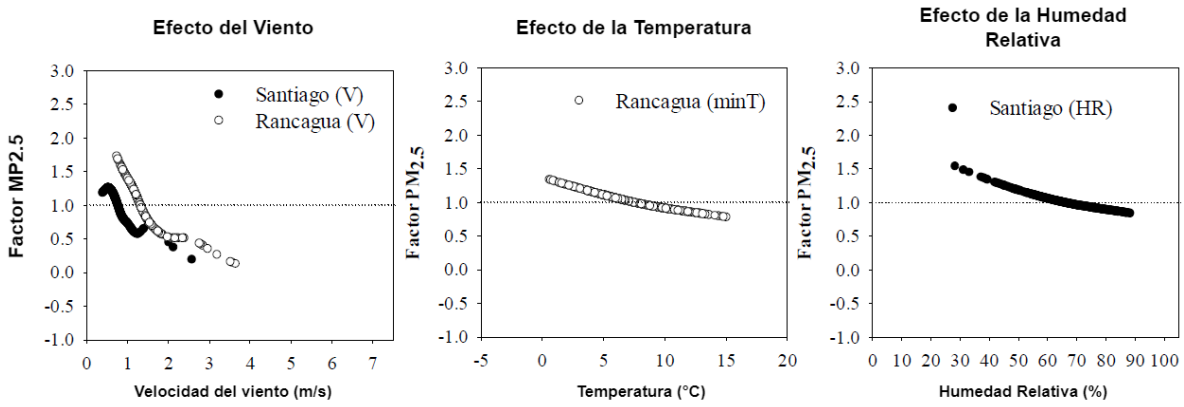

Figura 3: Factores MP2.5 para variables derivadas de velocidad del viento, temperatura y humedad relativa. Si los factores multiplicativos son mayores que uno, contribuyen a un aumento en el material particulado, y viceversa (Yáñez et al., 2017).

4.2.- PROCEDIMIENTOS SEREMI MA RM PARA LA REALIZACIÓN DE PRONÓSTICO DE CALIDAD DEL AIRE

A continuación, se presentan el diagrama de flujo y la descripción de los procedimientos que realiza la SEREMI MA de la RM para la realización del pronóstico de calidad del aire.

4.2.1.- DIAGRAMA DE FLUJO

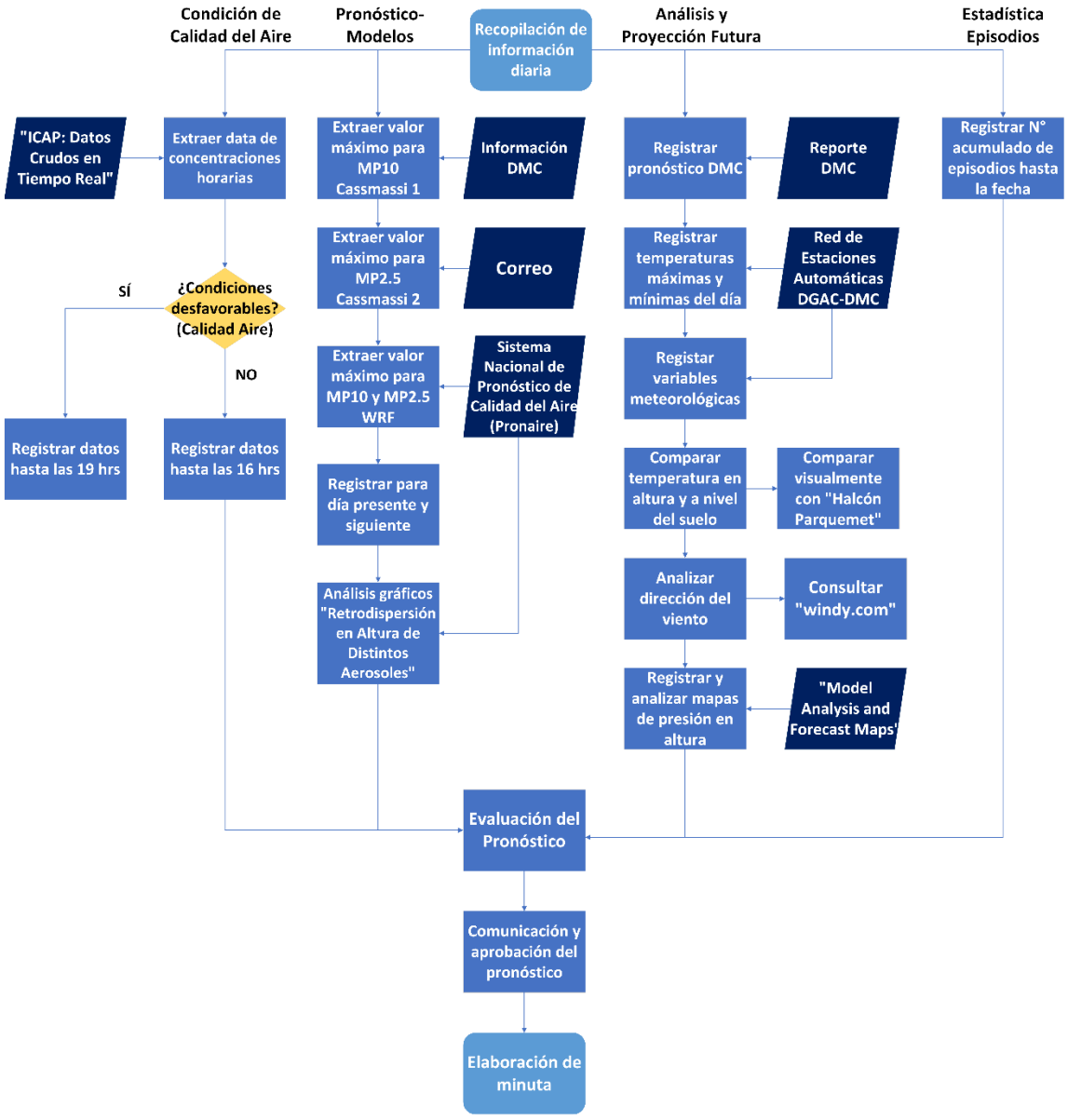

Figura 4: Diagrama de flujo de los procedimientos llevados a cabo por la SEREMI MA de la RM para realizar el pronóstico de calidad del aire.

4.2.2.- DESCRIPCIÓN PROCEDIMIENTOS

Para el pronóstico de calidad del aire llevado a cabo por la SEREMI MA de la RM, generalmente a partir de las 17:30 h se comienza a recopilar información para realizar una minuta diaria llamada "Minuta Interna GEC", la cual contiene las siguientes secciones:

1. Resumen: Pronóstico de la condición de calidad del aire para el día siguiente.

1.1. Para hacer el pronóstico se recolecta la información de concentraciones horarias en las distintas estaciones, los modelos (Cassmassi 1 y 2 y WRF) y las condiciones meteorológicas. Una vez que se tiene toda esta información, se emite un juicio y se realiza el pronóstico del día siguiente.

2. Condición de Calidad del aire: Concentraciones horarias en $\mu g/m^3$ en las distintas estaciones de la red MACAM (Figura 5).

2.1. Las concentraciones son extraídas de una página interna del MMA llamada "ICAP: Datos crudos en tiempo real" (macam.mma.gob.cl/icap/icap_metropolitana.php), para luego ser registradas en la planilla Excel maestra "Análisis GEC_2022".

2.2. En la minuta se registra para cada estación el valor correspondiente a las 16:00 h para MP10 y MP2.5 para el día actual y el anterior, además de los valores promedio para cada día y contaminante. Es un factor que no es muy influyente al momento de realizar el pronóstico (tiene más peso lo que digan los modelos y la DMC); sin embargo, da una referencia de cómo estuvo un día respecto al anterior.

2. Condición de calidad del aire

A continuación, se presentan las concentraciones horarias (µg/m3) en las distintas estaciones de la red MACAM[1]:

16:00	F	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	V	PROMEDIO
MP10 AYER	--	11	--	21	16	9	20	19	16	10	5	14
MP10 HOY	--	23	10	31	20	37	35	16	27	32	7	24
MP2,5 AYER	--	6	--	6	2	2	8	8	8	4	3	5
MP2,5 HOY	--	19	6	16	8	18	20	6	13	18	2	13

Figura 5: Ejemplo de la sección "Condición de calidad del aire" de la minuta interna GEC.

3. Pronósticos-Modelos: Cassmassi 1 entrega valores para MP10 y Cassmassi 2 para MP2.5, mientras que WRF es para ambos tipos de contaminantes (Figura 6). Los modelos reconocidos por el ministerio son Cassmassi 1 para MP10 y WRF para MP2.5 (los otros dos son utilizados como referencia).

3.1. Cassmassi 1 es extraído de la información entregada por la DMC.

3.2. Cassmassi 2 llega por correo.

3.3. Los valores pronosticados por WRF son extraídos de una página interna del MMA llamada "Sistema Nacional de Pronóstico de Calidad del Aire" (pronaire.mma.gob.cl/regiones/metropolitana.php), la cual entrega valores máximos para MP10 y MP2.5. En la minuta se registra el valor de la estación que haya tenido la concentración más alta ese día.

3.4. De la misma página anterior se extraen los gráficos Nefobasímetro OBS los cuales muestran la "retrodispersión en altura de distintos aerosoles" (Figura 7). Estos gráficos no son incorporados en las minutas, pero sí son guardados todos los días ya que sirven para realizar un análisis de forma cualitativa de las condiciones de calidad del aire.

3. Pronóstico - Modelos

Día	Hoy: 15-07-2022		Mañana: 16-07-2022	
Modelo	Cassmassi 1 y 2[1]	WRF	Cassmassi 1 y 2[1]	WRF
ICAP MP10	74 **Bueno**	22 **Bueno**	90 **Bueno**	65 **Bueno**
ICAP MP2,5	71 **Bueno**	46 **Bueno**	53 **Bueno**	170 **Regular**

1: Cassmassi 1 entrega valores para MP10 y Cassmassi 2 entrega valores para MP2,5.

Figura 6: Ejemplo de la sección "Pronóstico-Modelos" de la minuta interna GEC.

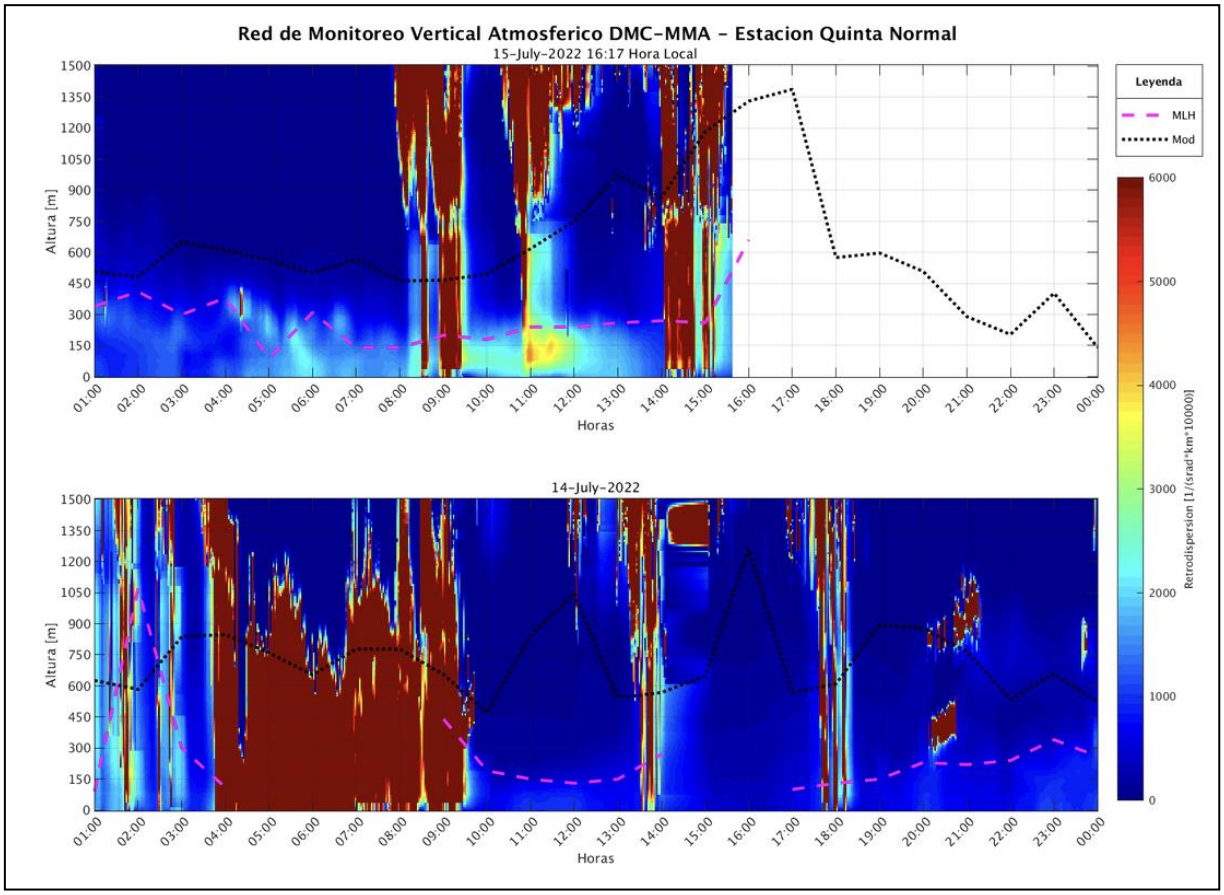

Figura 7: Ejemplos de gráficos de retrodispersión en altura de distintos aerosoles.

4. Análisis y Proyección Futura: La DMC envía todos los días un reporte meteorológico (y de cómo va a estar la ventilación en la cuenca) AM y otro PM, información la cual es registrada en la planilla. El reporte AM muestra tanto la concentración como el ICAP (como la norma de MP10 fue modificada en mayo no se utilizan estos valores del ICAP, sino que los datos de concentración son transformados al ICAP que corresponde con la nueva norma en la planilla maestra). Además, cabe destacar que utilizan como indicador el Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA), cuyo valor es inversamente proporcional al factor de ventilación después del mediodía.

4.1. Los 2 primeros párrafos de esta sección de la minuta se extraen directamente de los reportes entregados por la DMC (Figura 10).

4.2. Para registrar las temperaturas máximas y mínimas del día se evalúan 3 estaciones en la página de la DMC: Pudahuel, Quinta Normal y San Pablo.

4.3. En la planilla maestra de Excel también son registradas variables meteorológicas extraídas de la página de la DMC (Red de Estaciones Automáticas DGAC-DMC), de las

estaciones Lo Prado, Quinta Normal y San Pablo. Se almacena la tabla de datos horarios de cada estación (temperatura, velocidad del viento, dirección del viento, humedad), utilizando principalmente las variables de dirección del viento y temperatura, siendo esta última la más importante. La estación de Lo Prado está a mayor altura que la de Quinta Normal y San Pablo, por lo tanto, cuando la temperatura en Lo Prado es mayor que la que está en superficie, se asume que la capa de inversión térmica está baja. Análogamente, cuando la temperatura en altura es menor que en la superficie, se asume que la capa de mezcla está por sobre Lo Prado.

4.4. Lo anteriormente descrito se compara visualmente con lo que muestra el "Halcón Parquemet" (Figura 8). Se realizan capturas de pantalla a ciertos horarios durante el invierno, las cuales son almacenadas.

Figura 8: Ejemplo de "Halcón Parquemet".

4.5. Se revisa la dirección del viento de cada estación debido a que cuando existen viento del Este se considera una situación más desfavorable.

4.6. Entre la información que se utiliza para evaluar el pronóstico pero que no se registra, se encuentra consultar windy.com para poder visualizar de una forma gráfica cómo va a estar el viento en la cuenca al día siguiente (condiciones de buena o mala ventilación).

4.7. A través de la página "Model Analysis and Forecast Maps" (wxmaps.org/fcst.php), se registran y analizan mapas del día presente y siguiente que muestran presiones en altura (Figura 9). Su correcta interpretación permite dilucidar cuándo ocurrirá una

dorsal en altura, configuración tipo A o vaguada, además de permitir ponderar la información que llega de la DMC que en ocasiones suele ser un poco vaga.

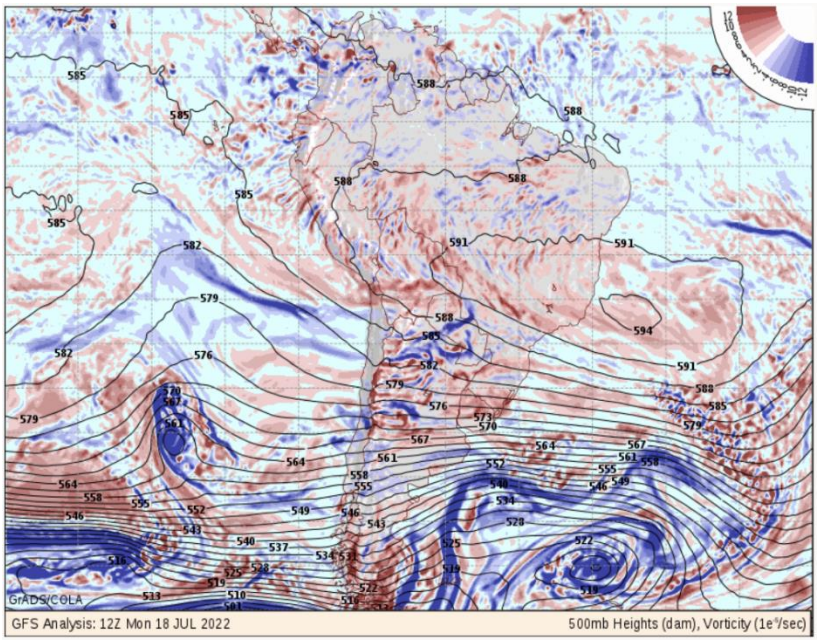

Figura 9: Ejemplo de mapa de presiones en altura.

4. Análisis y Proyección futura

Hoy, viernes 15 de julio, se aprecia el paso de un sistema frontal e inestabilidad atmosférica. El PMCA estará en el nivel de REGULAR/BAJO durante el resto del día, asociado a precipitaciones de variada intensidad y probablemente tormentas eléctricas.

Para mañana, sábado 16 de julio, se prevé régimen anticiclónico frío en superficie y vaguada en altura. El PMCA estará en el nivel de REGULAR durante toda la jornada.

Hoy se registró una mínima de 2,3°C (Quinta Normal 01:42h) y una máxima de 9,1°C (Quinta Normal 15:25h). Para mañana se esperan temperaturas entre -2°C y 9°C.

Para mañana el modelo Cassmassi 1 pronostica BUENO para MP10 (90 ICAP) y el modelo WRF pronostica REGULAR para MP2,5 (170 ICAP).

No existe probabilidad de advección hacia la cuenca de la Región Metropolitana.

Dados los niveles de concentración actuales y los observados previamente, los resultados de los modelos y las condiciones de ventilación, actuales y proyectadas, para mañana el nivel ICAP se prevé en: **REGULAR**.

Figura 10: Ejemplo de la sección "Análisis y Proyección Futura" de la minuta interna GEC.

5. Estadísticas Episodios: Es una tabla resumen (Figura 11) de la estadística a nivel interno y comunicacional con el número acumulado de episodios hasta la fecha en que se emite la minuta. Los datos de concentración se dan a las 18:00 h y se tienen datos desde las 16:00 hacia atrás; sin embargo, si es un día difícil (preemergencia, por ejemplo), se espera hasta las 20:30 h para tener datos desde las 19:00 h hacia atrás. Lo declarado es lo que emana de su pronóstico (la peor condición entre MP10 y MP2.5), mientras que lo constatado es lo real, es decir, lo que se midió ese día.

5. Estadística episodios (Episodios al 15/07/2022, horas acumuladas al día de hoy 16:00 hrs)

MP10 (2022)[2]	CASS1	SUG. AIRE	Declarado	Constatado	Horas Acumuladas
BUENO	24	16	16	29	1356
REGULAR	39	29	29	35	392
ALERTA	11	26	26	11	68
PREEMERGENCIA	3	6	6	1	0
EMERGENCIA	0	0	0	0	0
Total	77	77	77	76	1816
Total Episodios	**14**	**32**	**32**	**12**	**68**
MP2,5 (2022)	**WRF**	**SUG. AIRE**	**Declarado**	**Constatado**	**Horas Acumuladas**
BUENO	30	16	16	12	643
REGULAR	24	29	29	46	861
ALERTA	14	26	26	12	232
PREEMERGENCIA	9	6	6	6	80
EMERGENCIA	0	0	0	0	0
Total	77	77	77	76	1816
Total Episodios	**23**	**32**	**32**	**18**	**312**

Figura 11: Ejemplo de la sección "Estadística Episodios" de la minuta interna GEC.

4.3.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE VARIABLES METEOROLÓGICAS Y DE CALIDAD DEL AIRE RED MACAM

En la Tabla 3 se indica un resumen de la data meteorológica obtenida del SINCA de las 11 estaciones de la red MACAM, entre los años 2017 y 2022.

Tabla 3: Porcentaje de data perdida de variables meteorológicas en estaciones de la red MACAM (Fuente: SINCA).

Estación	% Data Perdida 2017	% Data Perdida 2018	% Data Perdida 2019	% Data Perdida 2020	% Data Perdida 2021	% Data Perdida 2022
Independencia (F)	1.36	0.73	0.20	0.18	21.00	100
La Florida (L)	16.15	2.82	0.00	0.09	0,00	1.37
Las Condes (M)	64.58	54.26	0.00	0.00	0.01	0.45
Parque O'Higgins (N)	0.00	3.42	0.00	0.00	0.80	0.03
Pudahuel (O)	4.29	1.68	1.05	0.03	0.00	0.10
Cerrillos (P)	100	100	100	100	100	100
El Bosque (Q)	0.10	32.76	0.44	0.76	0.08	0.03
Cerro Navia (R)	0.91	5.12	0.00	0.57	0.19	16.85
Puente Alto (S)	25.40	13.76	0.00	2.54	0.08	1.18
Talagante (T)	0.09	13.72	0.39	100	100	1.09
Quilicura (V)	100	100	100	100	100	100

Se puede apreciar que estaciones como Quilicura y Cerrillos presentan un 100% de data perdida para los 6 años abarcados para el estudio, por lo que no fueron consideradas para los análisis posteriores.

Las Figuras 12 y Figura 13 presentan los episodios críticos constatados de MP10 y MP2.5 por año, respectivamente. Se puede apreciar que las estaciones de Pudahuel y Cerro Navia, ubicadas en zonas bajas de la ciudad (481 msnm), son las que concentran la mayor ocurrencia de episodios de MP10 y MP2.5 a diferencia de estaciones como Las Condes (781 msnm) y La Florida (604 msnm), ubicadas cerca del pie de la montaña y que reciben la brisa que desciende desde la cordillera hacia Santiago (Alvarado, 2010).

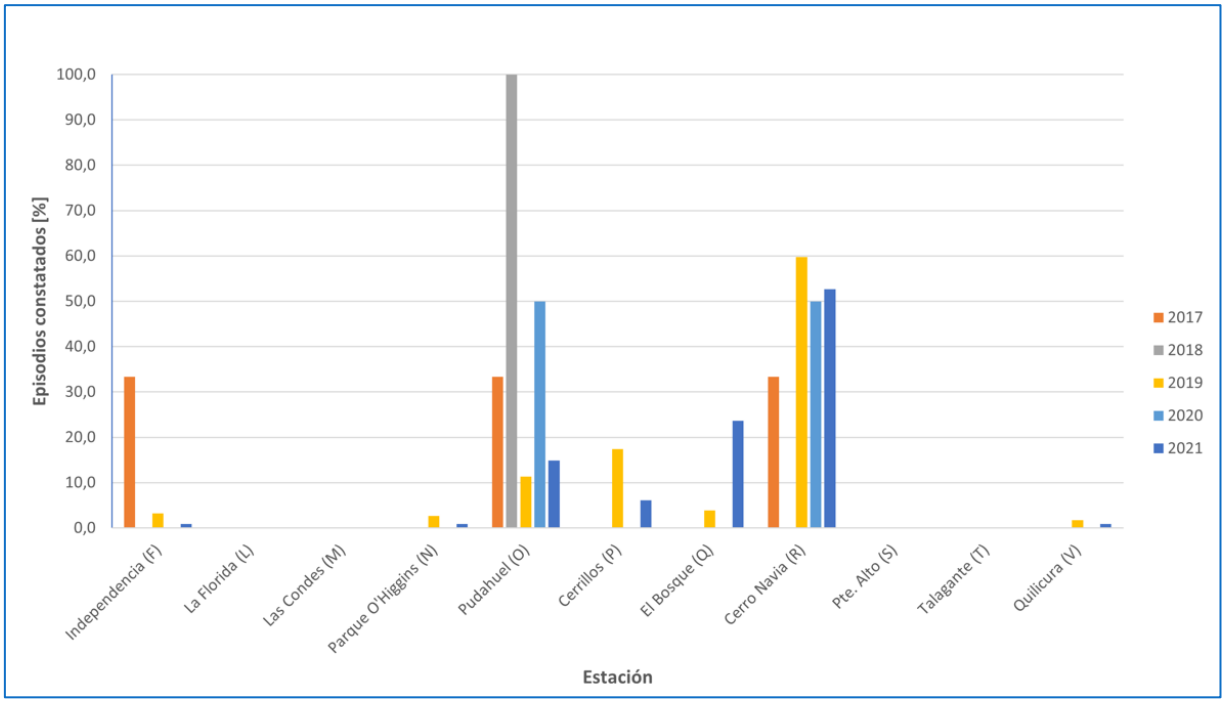

Figura 12: Episodios constatados de MP10 por año.

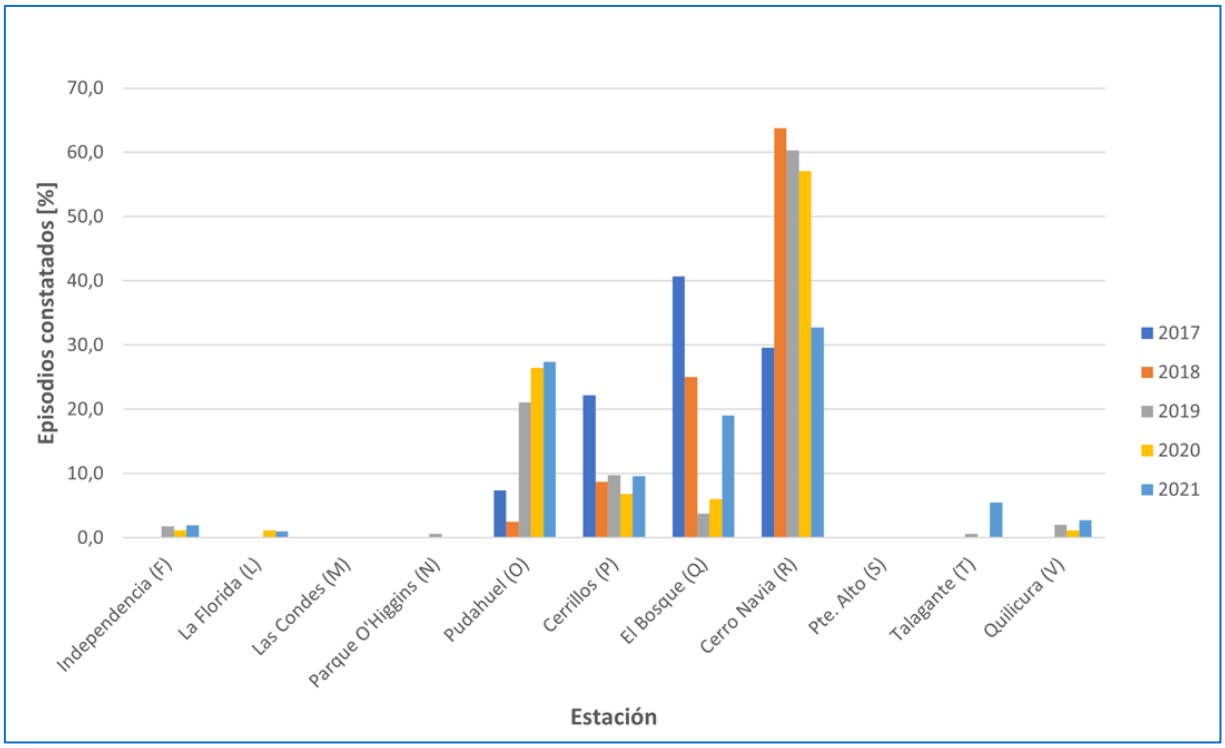

Figura 13: Episodios constatados de MP2.5 por año.

La Tabla 4 indica el número de episodios críticos constatados en Santiago por mes para MP2.5. Se puede observar que julio concentra la mayor ocurrencia de episodios críticos por MP2.5 en la ciudad debido a que es el mes más frío del año (Romero & Henrique, 2021). Durante el periodo invernal es común la inversión térmica en el valle central de Chile, pudiendo explicar bien los mayores niveles de polución durante los meses fríos por el limitado desarrollo de la capa de mezcla y el débil viento en su interior (Yáñez et al., 2017).

Tabla 4: Número de episodios críticos constatados en Santiago por mes, MP2.5.

Mes	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Total	%
Mayo	5	7	3	1	4	6	**26**	**15.1**
Junio	10	17	12	4	8	10	**61**	**35.5**
Julio	9	10	16	11	18	3	**67**	**39.0**
Agosto	3	5	3	1	6	0	**18**	**10.4**

4.3.1.- SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA ENTRE VARIABLES

En las Figuras 14 a la Figura 17 se pueden observar los coeficientes de correlación para distintas estaciones de la red MACAM. Las variables para correlacionar son MP10 máximo, MP10 promedio, velocidad del viento promedio, temperatura mínima, porcentaje de humedad relativa promedio y el rango de temperaturas (la diferencia entre la temperatura máxima y mínima del día).

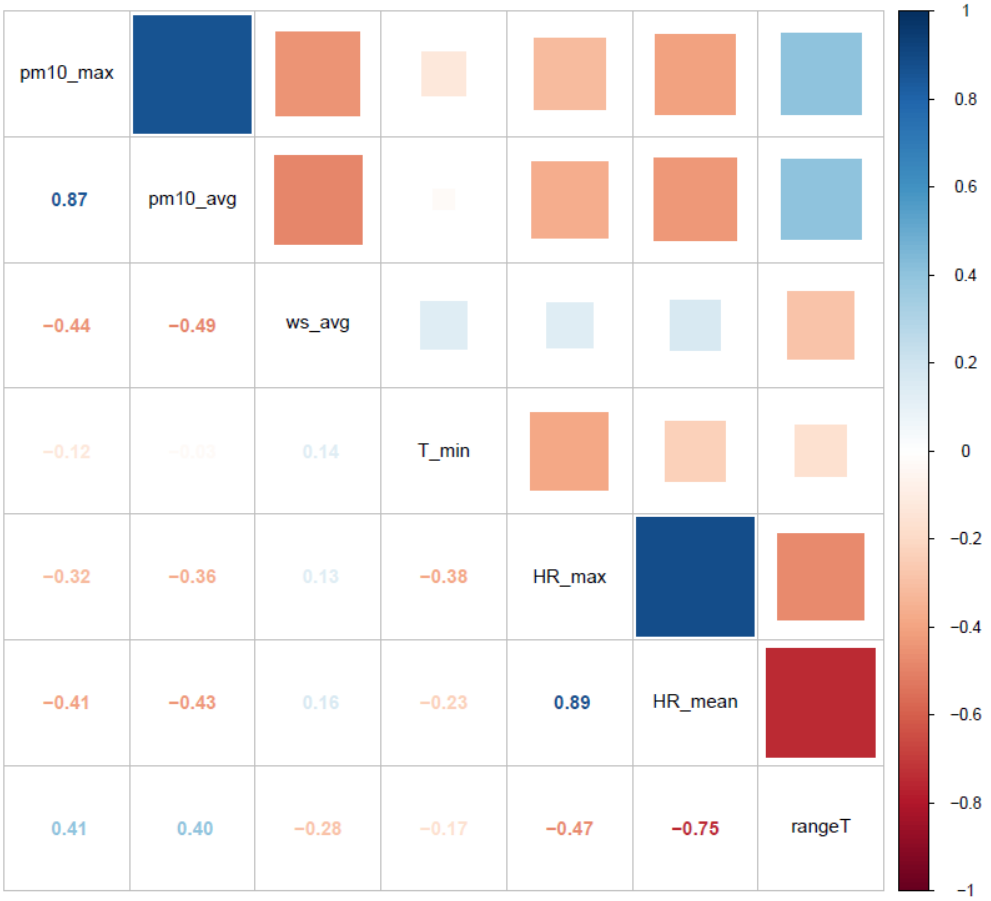

Figura 14: Coeficientes de correlación para estación Independencia.

Figura 15: Coeficientes de correlación para estación Cerro Navia.

Figura 16: Coeficientes de correlación para estación Pudahuel.

Figura 17: Coeficientes de correlación para estación El Bosque.

Se puede apreciar que la variable con mayor significancia estadística es la magnitud de la velocidad del viento promedio (ws_avg), en todos casos con signo negativo, es decir, presenta una relación inversamente proporcional con la concentración promedio de MP10 y MP2.5. La temperatura mínima no permite explicar la variación de los promedios o máximos de MP10 y MP2.5 observados en las estaciones analizadas; sin embargo, el rango de temperaturas de 24 horas presenta un coeficiente de correlación mayor a 0.5 en estaciones como Cerro Navia, Pudahuel y El Bosque. Esta diferencia podría ser una consecuencia indirecta de la presencia de eventos de inversión térmica en el día.

Yáñez et al. (2017) en su estudio determinaron que las medias diarias de cada variable meteorológica no eran un buen predictor de la concentración de material particulado, excepto en el caso de la velocidad media del viento. El coeficiente de correlación puede tener un mal desempeño cuando las relaciones no son lineales, por lo que el efecto de las variables meteorológicas sobre el material particulado se estudió mediante la construcción de Modelos Aditivos Generalizados (GAM), los cuales incorporan relaciones no paramétricas entre las variables (Barmpadimos et al., 2011).

4.3.2.- MODELOS ADITIVOS GENERALIZADOS (GAM)

Las Figura 18 a la Figura 21 muestran la construcción de GAMs para el material particulado y distintas variables meteorológicas.

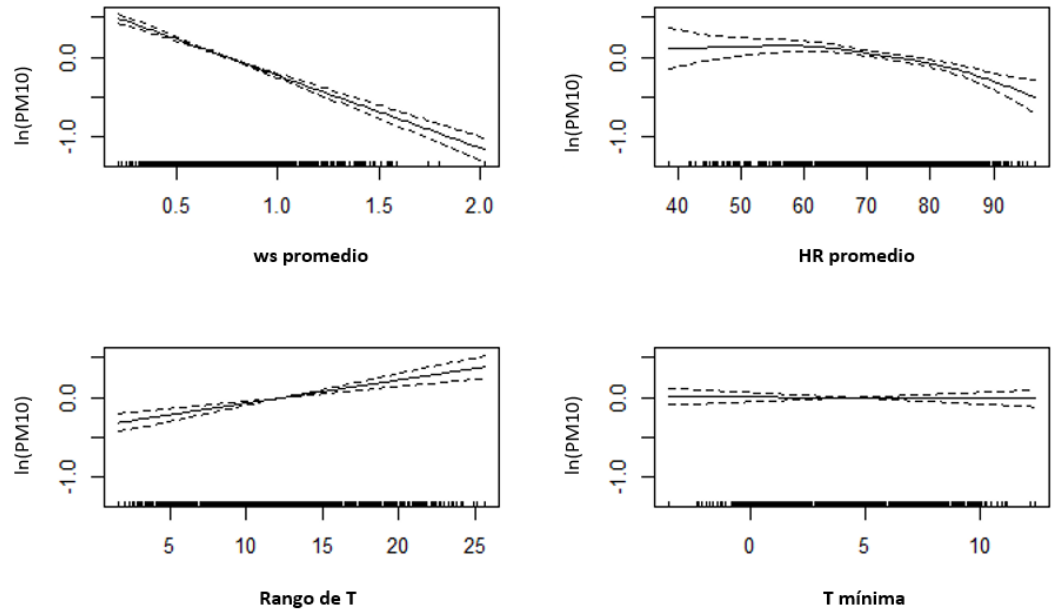

Figura 18: Modelos Aditivos Generalizados entre MP10 y variables meteorológicas, estación Cerro Navia.

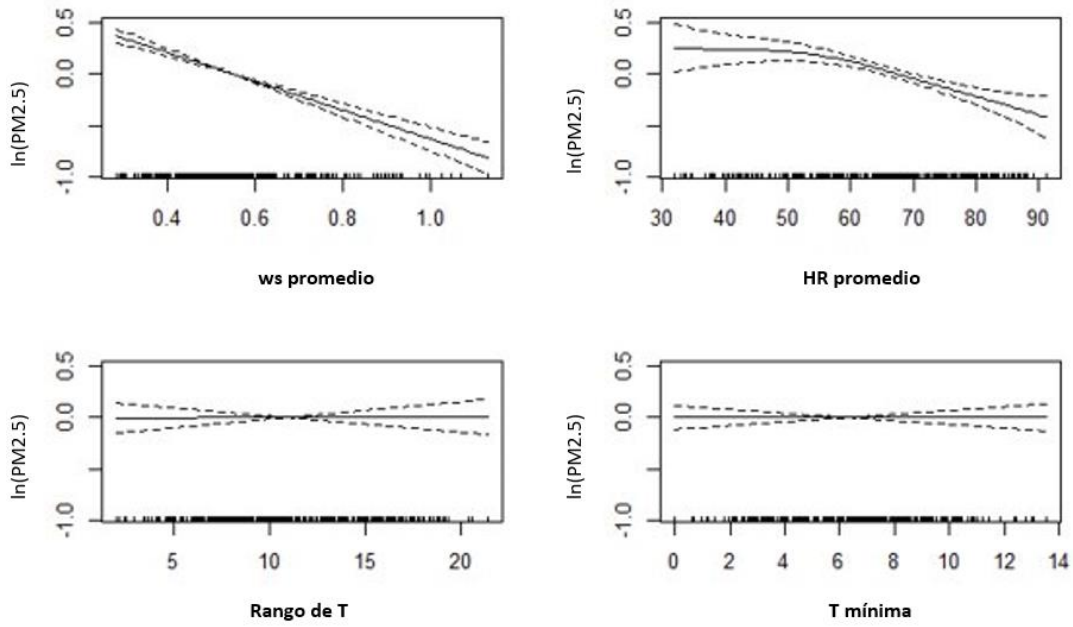

Figura 19: Modelos Aditivos Generalizados entre MP2.5 y variables meteorológicas, estación Independencia.

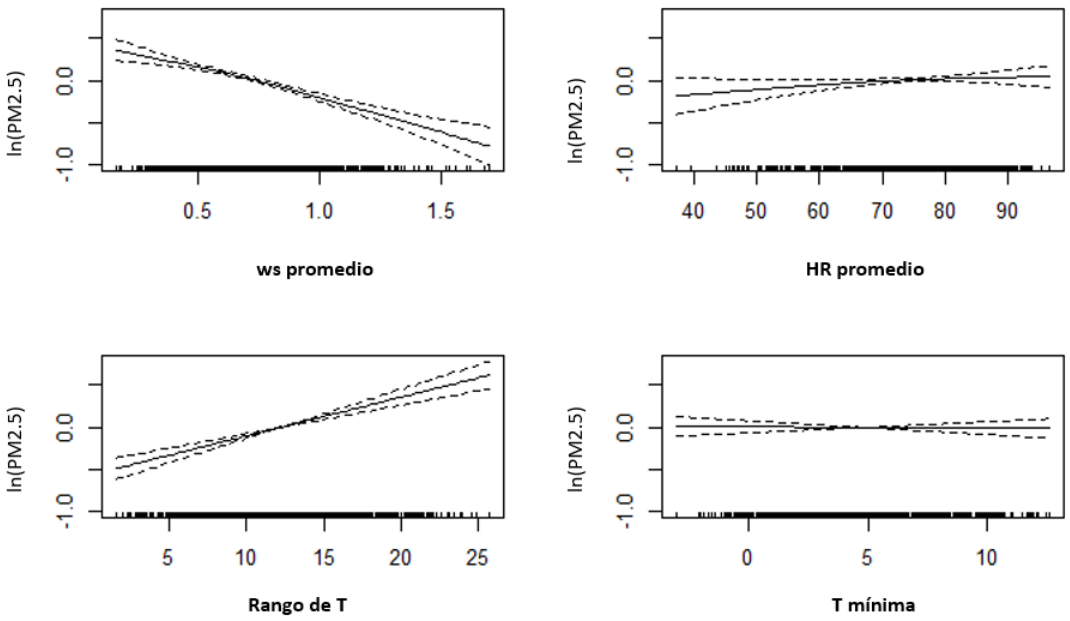

Figura 20: Modelos Aditivos Generalizados entre MP2.5 y variables meteorológicas, estación Pudahuel.

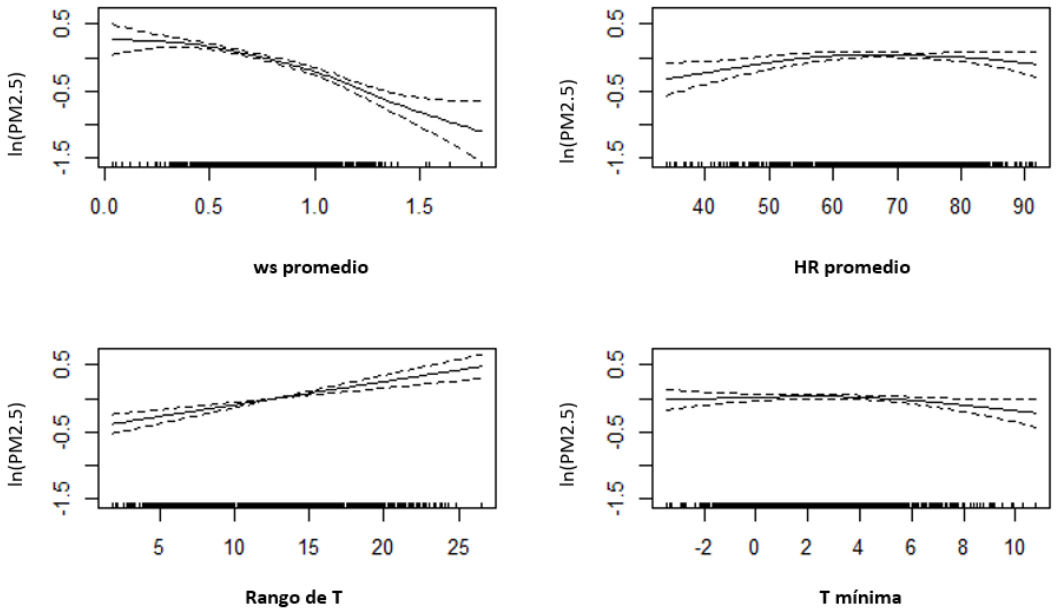

Figura 21: Modelos Aditivos Generalizados entre MP2.5 y variables meteorológicas, estación El Bosque.

Las tendencias determinadas mediante la aplicación de modelos GAM indican el efecto por separado que tiene cada variable sobre la respuesta evaluada. En todas las estaciones se tiene una relación inversa entre la velocidad media del viento y el nivel de MP2.5 y/o MP10, mientras que el rango de temperatura muestra una proporción directa, significativa y lineal.

Una baja temperatura mantiene la altura de mezcla cerca del suelo y viceversa, lo cual afecta la dispersión de contaminantes. De esta manera, una mayor variación de temperatura a lo largo del día durante la temporada fría (evaluada por el rango de temperatura) podría fortalecer la inversión térmica, afectando de forma negativa la dispersión de material particulado (El Shazly et al., 2012; Yáñez et al., 2017).

En el caso de la humedad relativa promedio, esta muestra una influencia que depende de su valor. Por ejemplo, en la estación Cerro Navia existe un cambio de tendencia cerca del 65%, en donde el material particulado comienza a descender a medida que la humedad relativa aumenta a partir de ese punto. Algo similar ocurre en la estación Independencia, en donde existe un cambio de tendencia cerca del 50%. Esta variable está asociada de manera directa con el vapor de agua disponible en la atmósfera y afecta el proceso de crecimiento e hidratación de las partículas (Yáñez et al., 2017).

En las Figura 22 a la Figura 24 se muestran el material particulado promedio horario en días con humedad relativa mayor y menor al 65% para MP10, y al 70% para MP2.5.

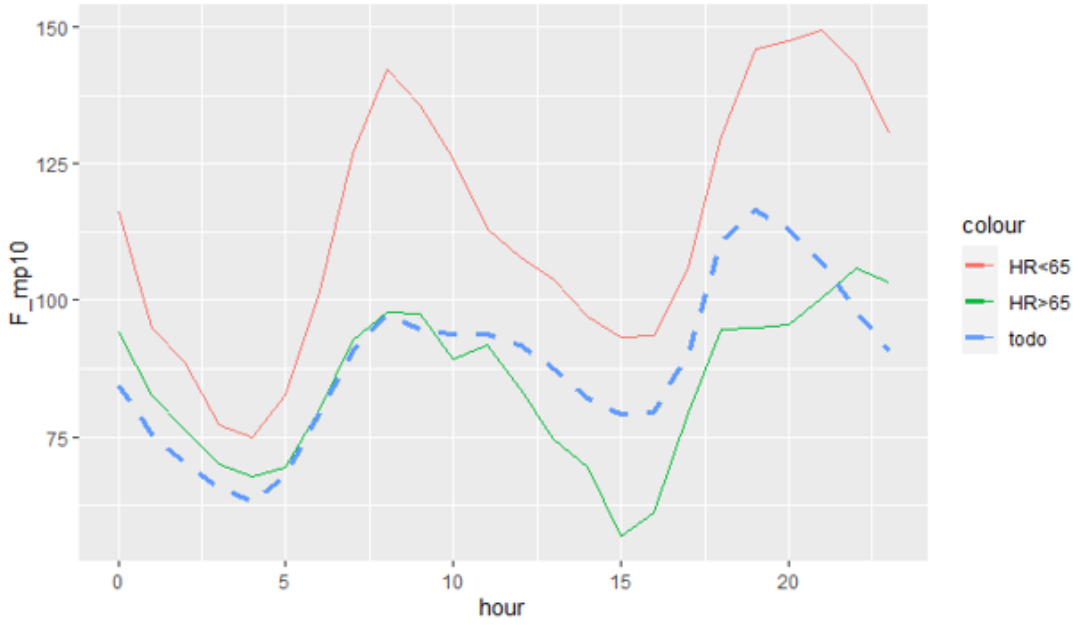

Figura 22: MP10 promedio horario (azul) en días con humedad relativa mayor (verde) y menor al 65% (rojo) en estación Independencia, año 2019.

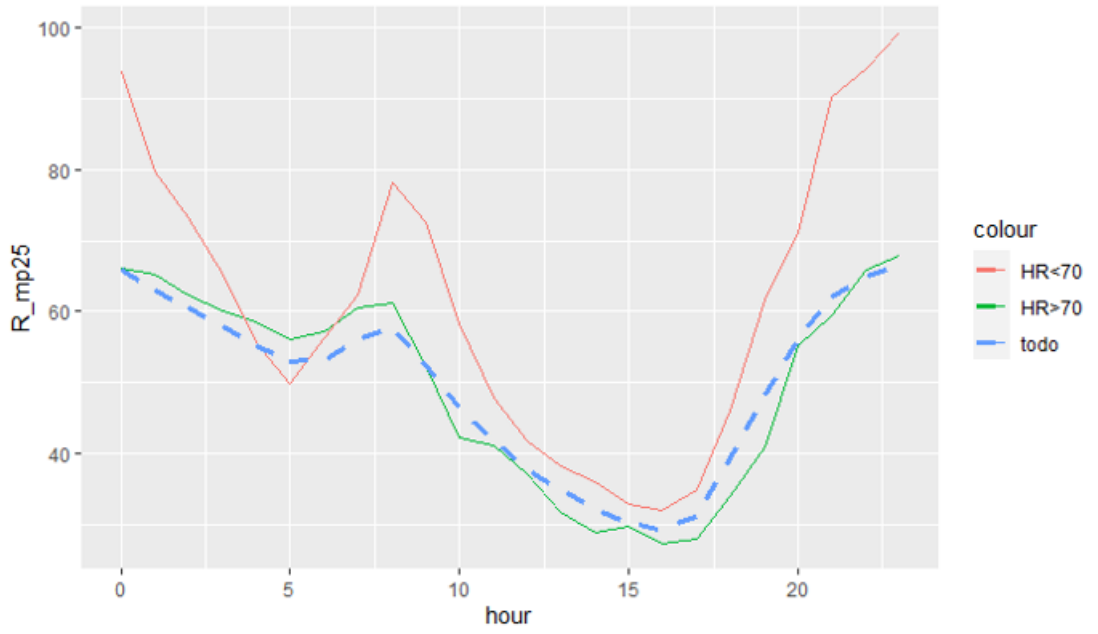

Figura 23: MP2.5 promedio horario (azul) en días con humedad relativa mayor (verde) y menor al 70% (rojo) en estación Cerro Navia, año 2019.

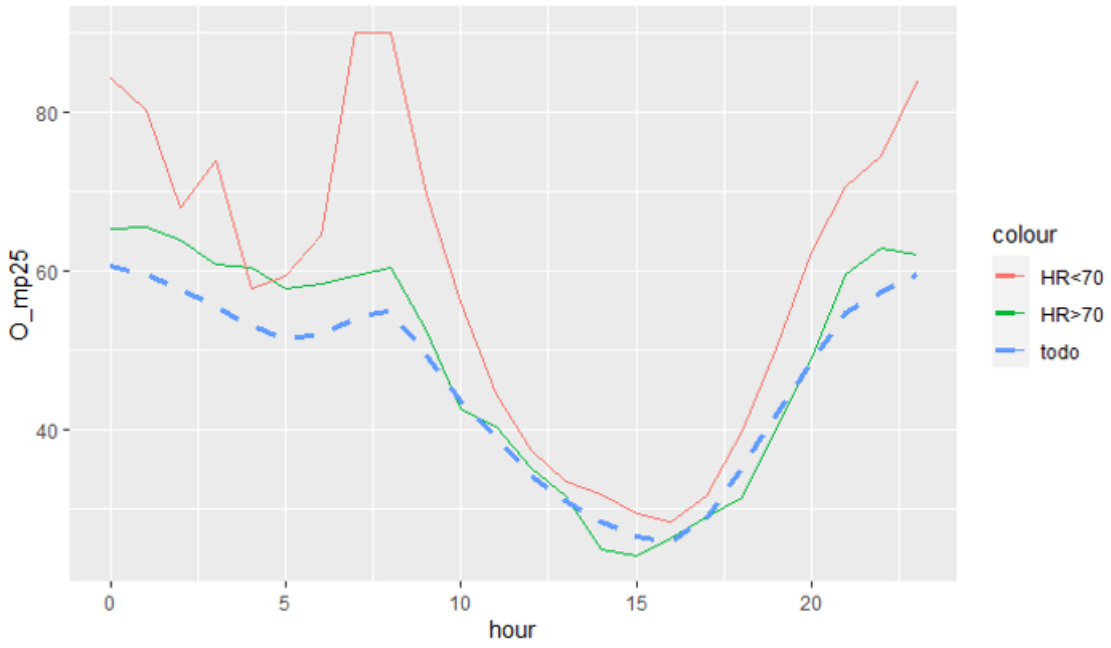

Figura 24: MP2.5 promedio horario (azul) en días con humedad relativa mayor (verde) y menor al 70% (rojo) en estación Pudahuel, año 2021.

Se puede apreciar en la Figura 22, que el MP10 estuvo por sobre la media normal en días en que la humedad relativa estuvo por debajo del 65% en la estación Independencia, mientras que las Figura 23 y Figura 24 muestran que el MP2.5 estuvo por sobre la media normal en días en que la humedad relativa estuvo por debajo del 70%, a excepción del año 2019 en la estación Cerro Navia en que estuvo por debajo la media normal entre las 4 y las 6 de la mañana.

4.3.3.- EFECTO DE LA INVERSIÓN TÉRMICA

En las Figura 25 a la Figura 30 se pueden observar el promedio diario de material particulado en días con y sin inversión térmica entre las estaciones Lo Prado, San Pablo y Quinta Normal de la DMC.

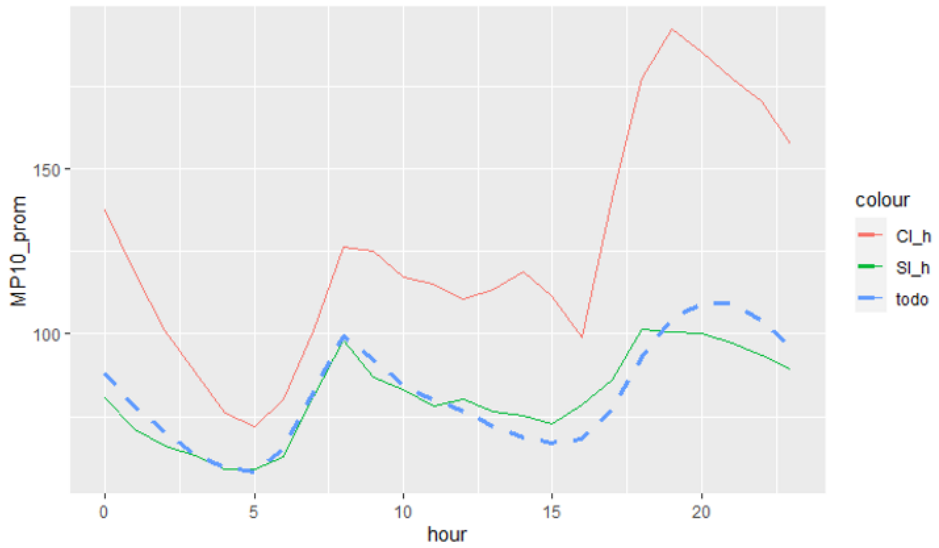

Figura 25: MP10 promedio horario (azul) en días con (rojo) y sin inversión térmica (verde) entre estaciones Lo Prado y San Pablo, año 2019.

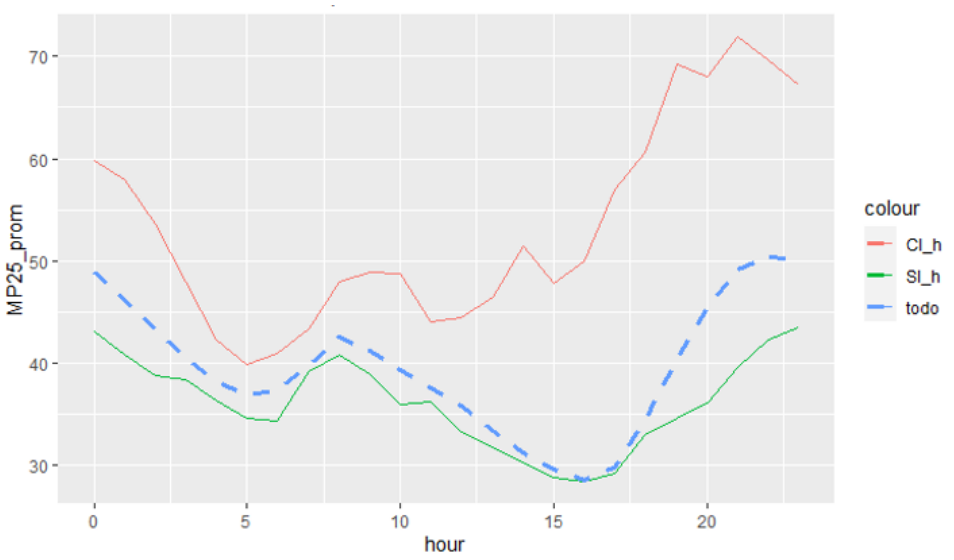

Figura 26: MP2.5 promedio horario (azul) en días con (rojo) y sin inversión térmica (verde) entre estaciones Lo Prado y Quinta Normal, año 2019.

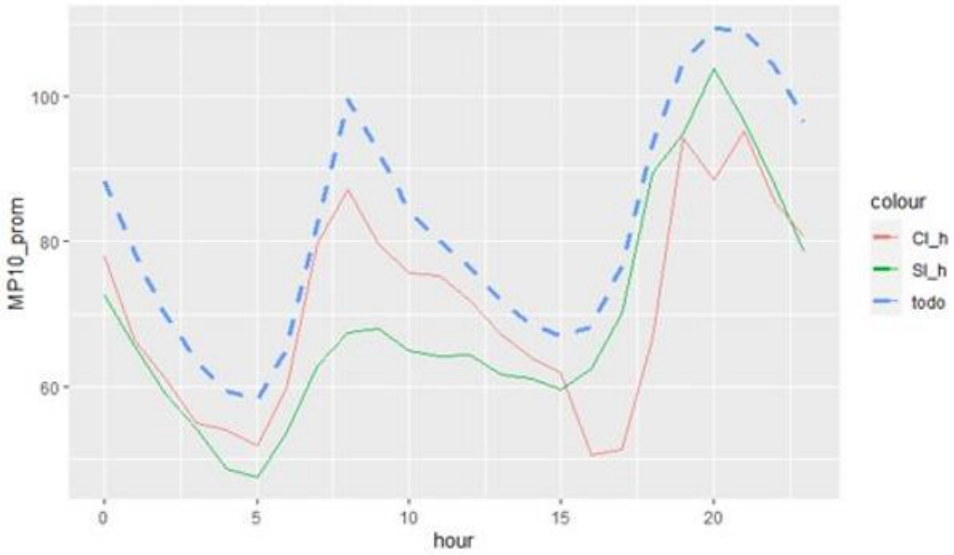

Figura 27: MP10 promedio horario (azul) en días con (rojo) y sin inversión térmica (verde) entre estaciones Lo Prado y San Pablo, año 2020.

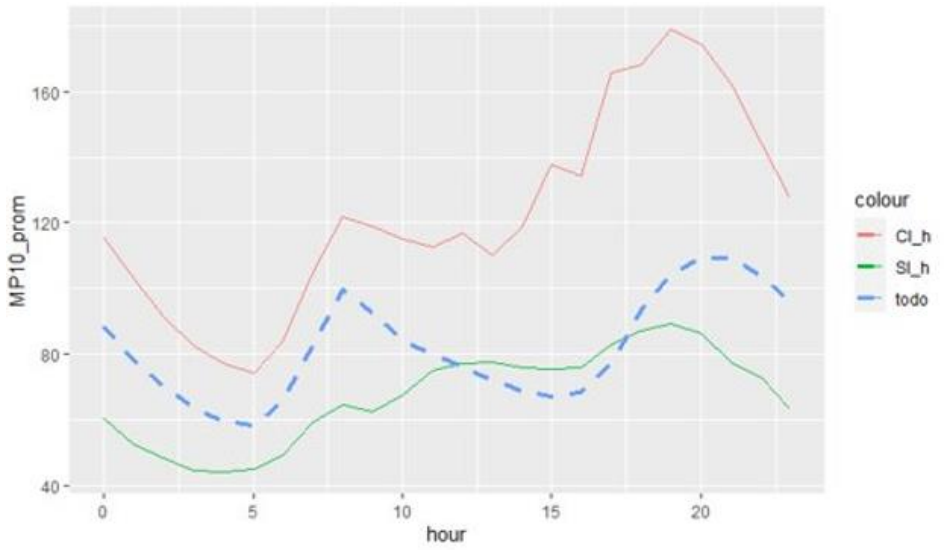

Figura 28: MP10 promedio horario (azul) en días con (rojo) y sin inversión térmica (verde) entre estaciones Lo Prado y San Pablo, año 2021.

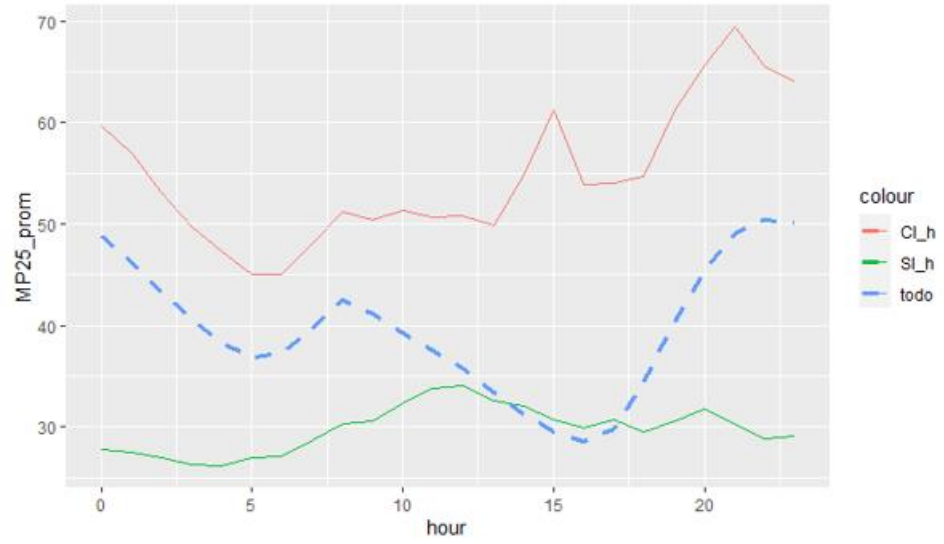

Figura 29: MP2.5 promedio horario (azul) en días con (rojo) y sin inversión térmica (verde) entre estaciones Lo Prado y Quinta Normal, año 2021.

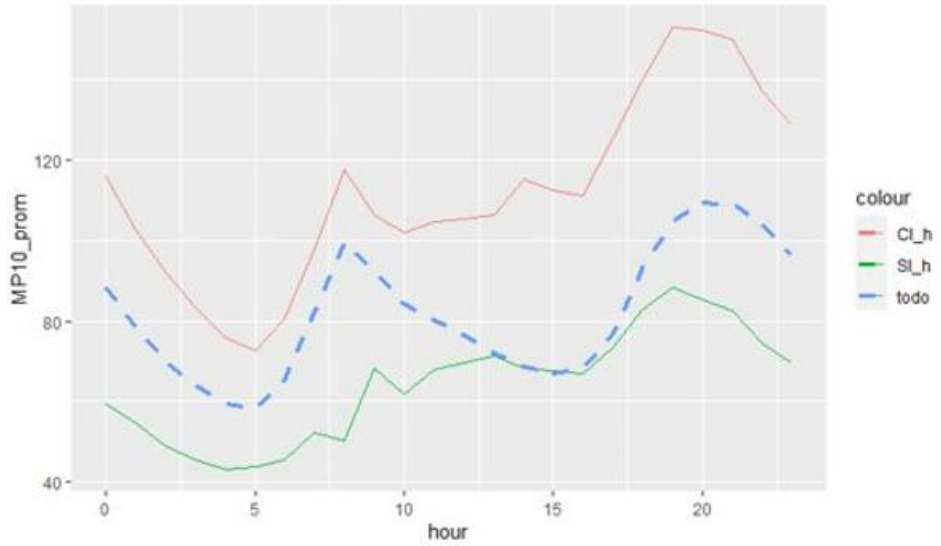

Figura 30: MP10 promedio horario (azul) en días con (rojo) y sin inversión térmica (verde) entre estaciones Lo Prado y San Pablo, año 2022.

Se puede observar que, a excepción del año 2020, el MP10 y MP2.5 se presentaron por sobre la media normal en días con inversión térmica, mientras que, en general, en los días sin inversión estuvieron por debajo de la media. La variabilidad diaria en los niveles de contaminación depende principalmente de los cambios en el grado de estabilidad atmosférica cerca de la superficie en el periodo nocturno y del desarrollo de la capa de mezcla y los vientos en su interior en el periodo diurno (Garreaud & Rutllant, 2006). En este contexto, la inversión térmica es común en el valle central de Chile y puede explicar bien los mayores niveles de polución durante los meses fríos por el limitado desarrollo de la capa de mezcla y el débil viento en su interior (Yáñez et al., 2017).

Durante 2020, el MP10 se presentó por debajo la media normal en días con y sin inversión debido posiblemente a cambios en las emisiones de material particulado durante las cuarentenas por COVID-19, lo cual alteró el nivel de actividad regular observado en los otros años. En efecto, la cuarentena absoluta que se decidió sobre la Región Metropolitana empezó en mayo del 2020, y concluyó a fines de agosto.

4.3.4.- ANÁLISIS DEL EFECTO MÚLTIPLE DE VARIABLES METEOROLÓGICAS

La Figura 31 indica el MP2.5 promedio móvil de 24 horas en función del rango de temperatura y coloreado por niveles de humedad relativa. Se puede observar cómo a medida que aumenta el rango de temperatura también lo hace la concentración de MP2.5, mientras que la humedad relativa desciende. De lo anterior, se puede deducir que una mayor variación de temperatura a lo largo del día durante la temporada fría (asociado a un fortalecimiento de la inversión térmica), sumado a la presencia de un aire más seco, podría ser desfavorable para la dispersión de contaminantes.

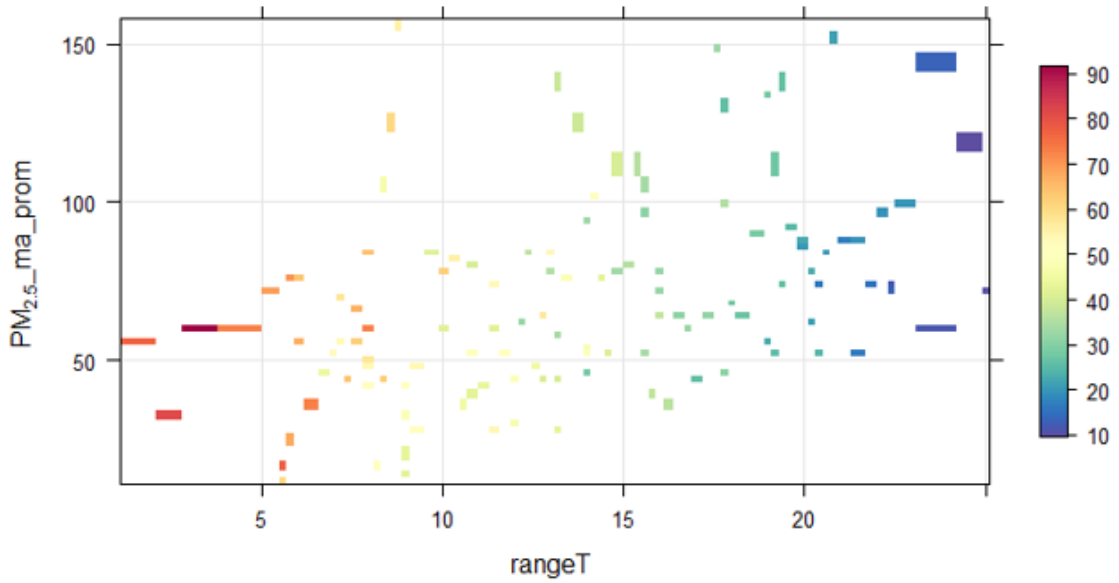

Figura 31: MP2.5 promedio móvil de 24 horas en función del rango de temperatura y coloreado por niveles de humedad relativa mínima, estación Cerro Navia.

Una situación similar se puede apreciar en la Figura 32, en donde se indica el MP10 promedio en función de la diferencia de temperatura entre las estaciones Lo Prado y San Pablo y coloreado por niveles de humedad relativa. Lo Prado está a mayor altura con respecto a San Pablo (ubicadas a 1068 y 482 msnm, respectivamente), por lo que un gradiente vertical de temperatura negativo representa un indicio de presencia de inversión térmica (la temperatura aumenta con la altura). Se puede observar que un gradiente más negativo, asociado a una estabilidad atmosférica mayor, sumado a un aire más seco, podría aumentar la concentración de contaminante.

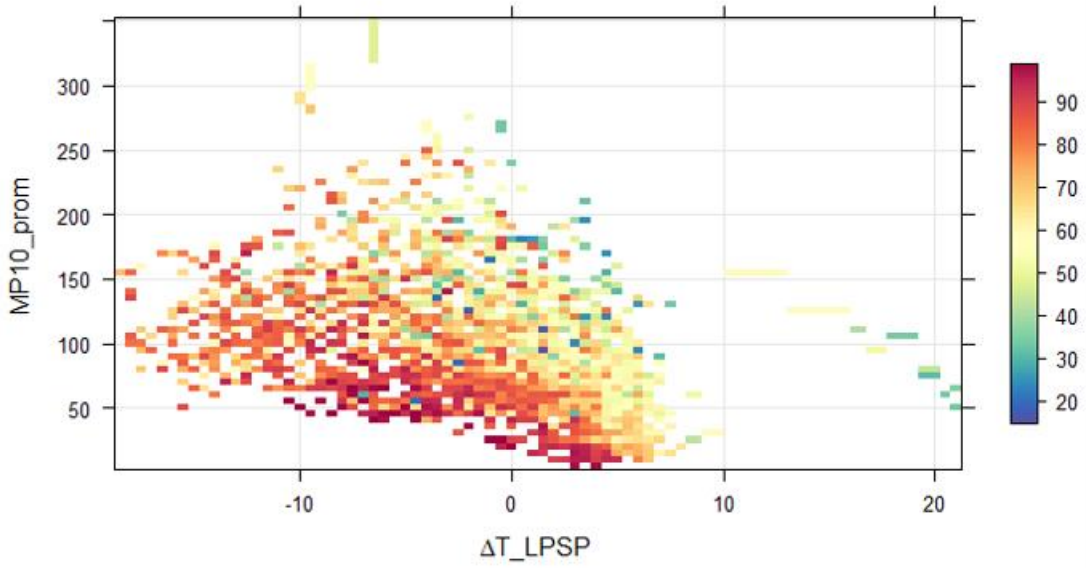

Figura 32: MP10 promedio en función de la diferencia de temperatura entre estaciones Lo Prado y San Pablo y coloreado por niveles de humedad relativa, estación Cerro Navia.

4.3.5.- EFECTO DE LA DIRECCIÓN DEL VIENTO

En las Figura 33 y Figura 34, se pueden apreciar gráficos polares de MP2.5 en función de la velocidad y dirección del viento.

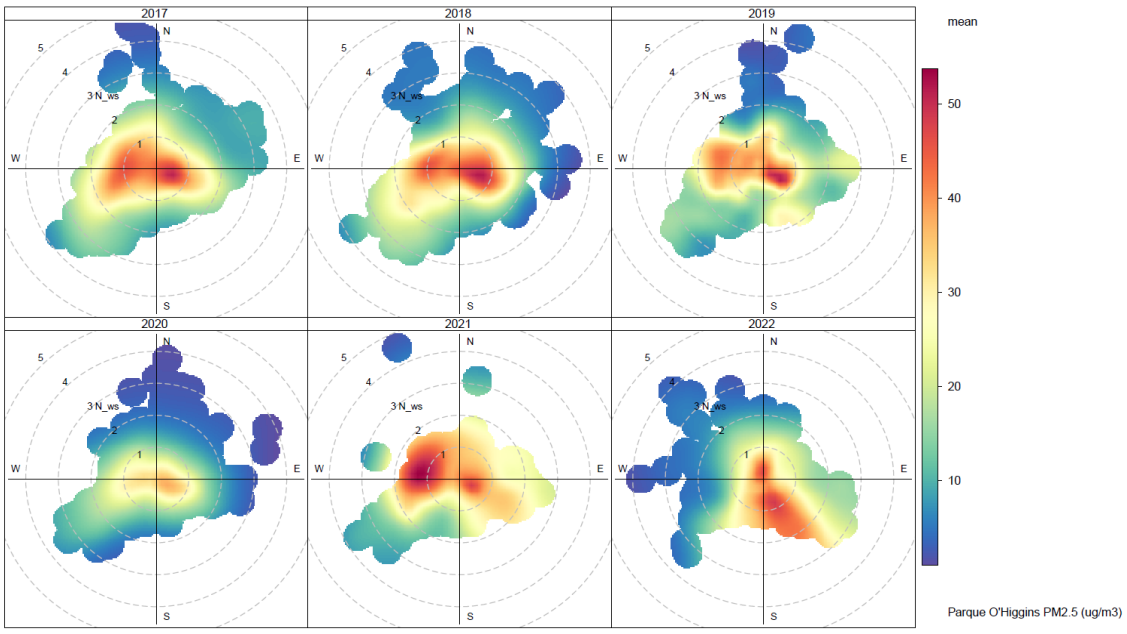

Figura 33: Gráficos polares de MP2.5 en función de la velocidad del viento de 2017 a 2022, estación Parque O'Higgins.

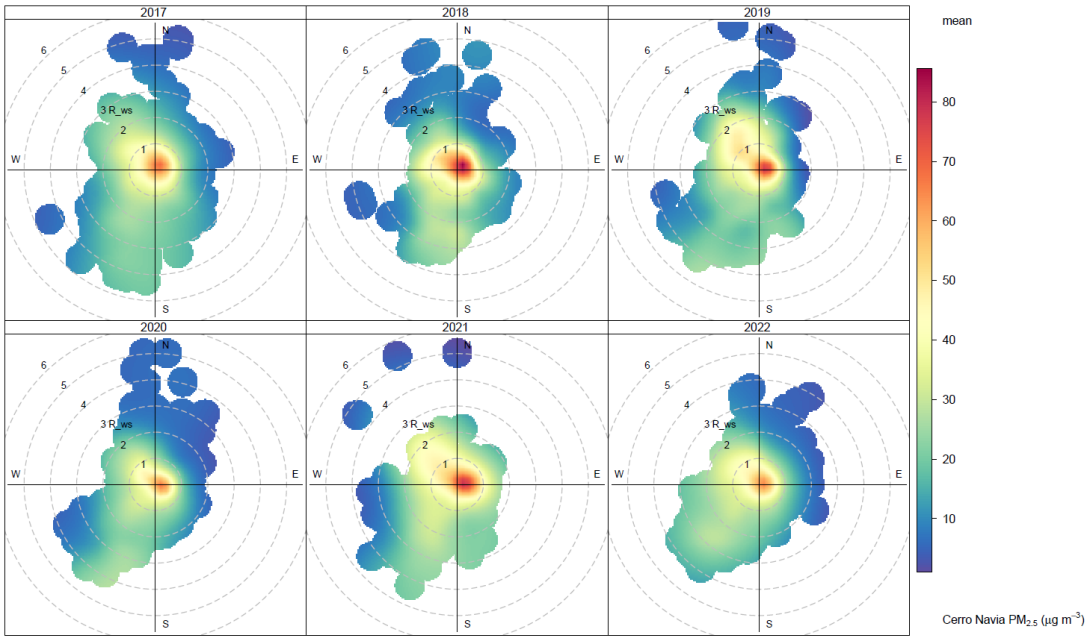

Figura 34: Gráficos polares de MP2.5 en función de la velocidad del viento de 2017 a 2022, estación Cerro Navia.

Se puede apreciar que, a menores magnitudes de velocidad del viento, mayor es la concentración de MP2.5; sin embargo, no es posible establecer a primera vista una relación entre el contaminante y la dirección del viento. En las Figura 35 a la Figura 38 se puede apreciar el comportamiento de la dirección del viento durante distintos episodios críticos constatados.

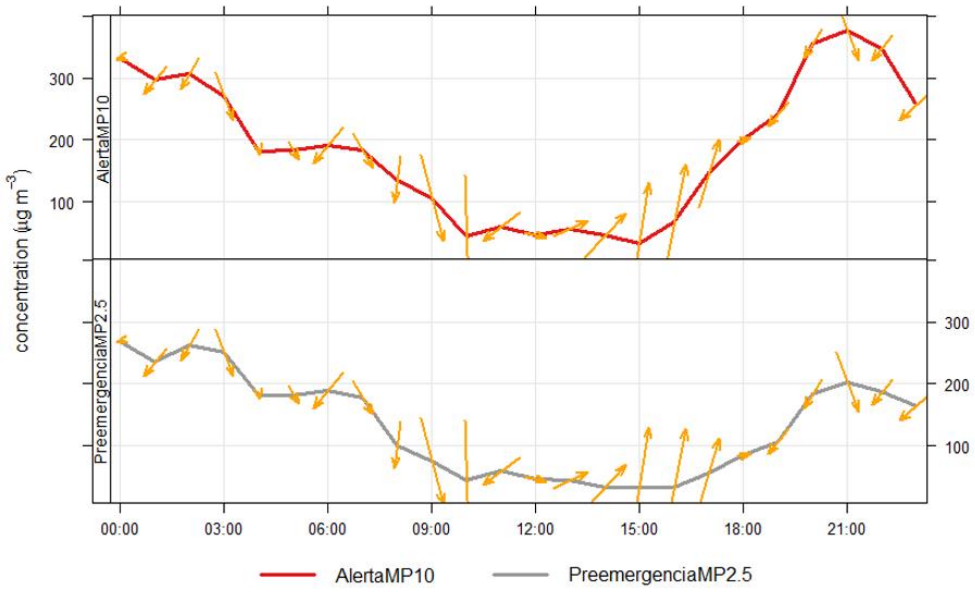

Figura 35: Efecto de la velocidad y dirección del viento durante Alerta de MP10 y Preemergencia de MP2.5 en estación Pudahuel, 17-06-2018.

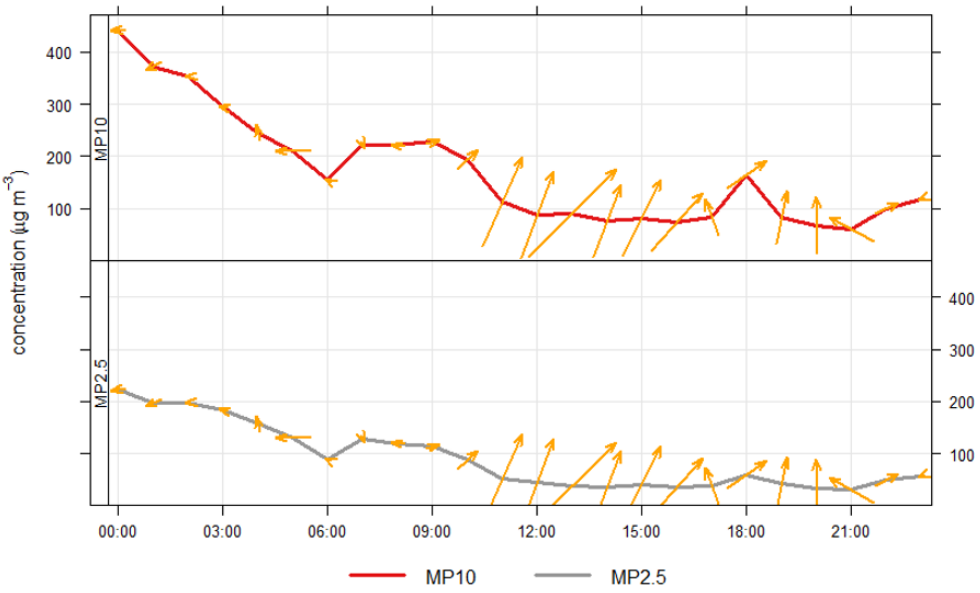

Figura 36: Efecto de la velocidad y dirección del viento durante Preemergencia en estación Cerro Navia, 06-07-2019.

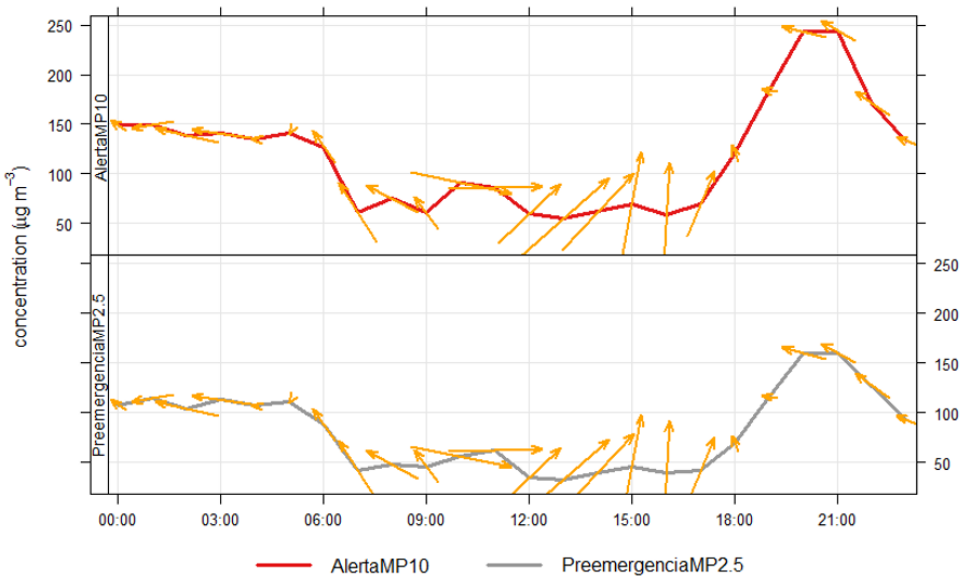

Figura 37: Efecto de la velocidad y dirección del viento durante Alerta de MP10 y Preemergencia de MP2.5 en estación El Bosque, 20-06-2021.

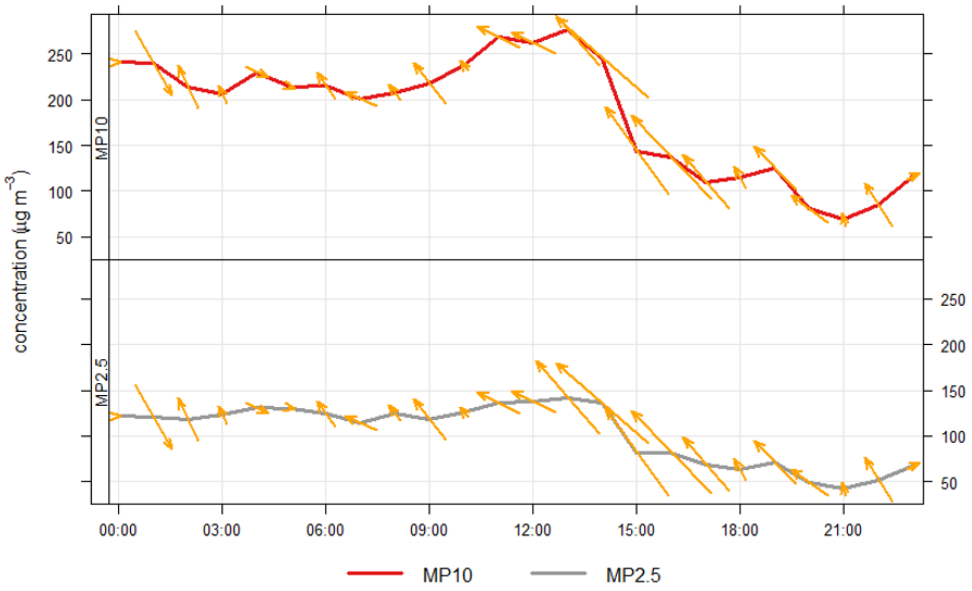

Figura 38: Efecto de la velocidad y dirección del viento durante Preemergencia en estación Parque O'Higgins, 28-05-2022.

Durante la ocurrencia de episodios, es posible observar la presencia de vientos provenientes del Este, Noreste y Sureste durante *peaks* de contaminación sumado a menores magnitudes de velocidad del viento.

4.4.- ACTIVIDADES ANTRÓPICAS QUE CONTRIBUYEN EN LA OCURRENCIA DE EPISODIOS CRÍTICOS

La Tabla 5 presenta el número de episodios críticos constatados en Santiago por día para MP2.5.

Tabla 5: Número de episodios críticos constatados en Santiago por día, MP2.5.

Día	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Total	%
L	6	5	5	2	7	4	**29**	**16.9**
M	5	2	1	2	3	2	**15**	**8.7**
W	3	5	5	2	2	1	**18**	**10.4**
J	2	5	3	2	4	0	**16**	**9.3**
V	1	3	4	1	5	2	**16**	**9.3**
S	3	11	8	4	8	7	**41**	**23.8**
D	7	8	8	4	7	3	**37**	**21.5**

Sumado al efecto de la estación fría, se puede apreciar que los días sábado y domingo (fin de semana) concentran el 45.3% de la ocurrencia de episodios ocurridos en la ciudad, seguido del lunes con un 16.9%. Esto puede ser debido a efectos antrópicos como la combustión de leña en hogares o a emisiones de gases por parte de vehículos. Esta idea se desarrolla con mayor profundidad más adelante, mediante análisis estacionales.

4.4.1.- ANÁLISIS ESTACIONALES

Las Figura 39 a la Figura 43 muestran análisis estacionales de la evolución en la concentración de MP10 Y MP2.5 promedio 24 horas por mes, promedio 24 horas diario y horaria en distintas estaciones de la red MACAM.

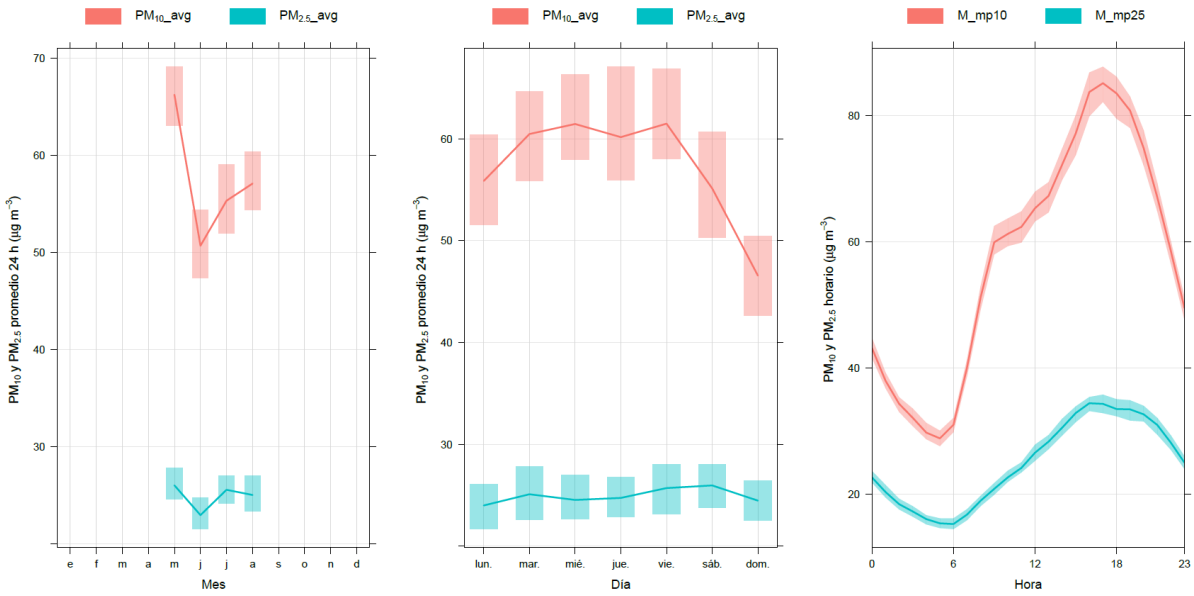

Figura 39: MP10 (rojo) y MP2.5 (celeste) promedio 24 h por mes (izq.), promedio 24 h diario (centro) y horario (der.), estación Las Condes.

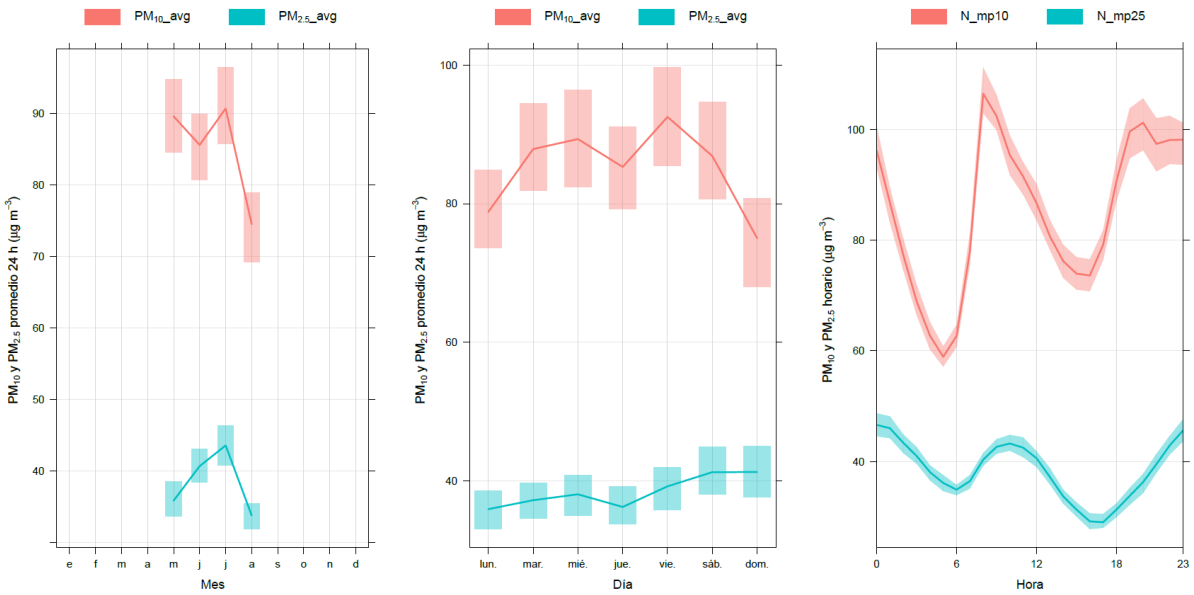

Figura 40: MP10 (rojo) y MP2.5 (celeste) promedio 24 h por mes (izq.), promedio 24 h diario (centro) y horario (der.), estación Parque O'Higgins.

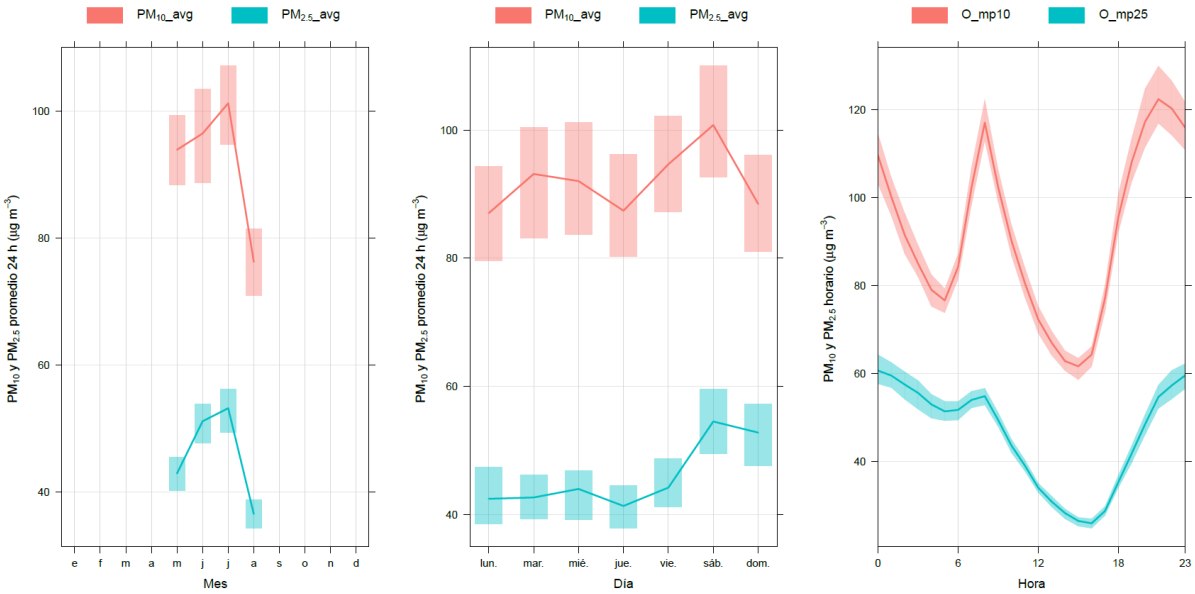

Figura 41: MP10 MP10 (rojo) y MP2.5 (celeste) promedio 24 h por mes (izq.), promedio 24 h diario (centro) y horario (der.), estación Pudahuel.

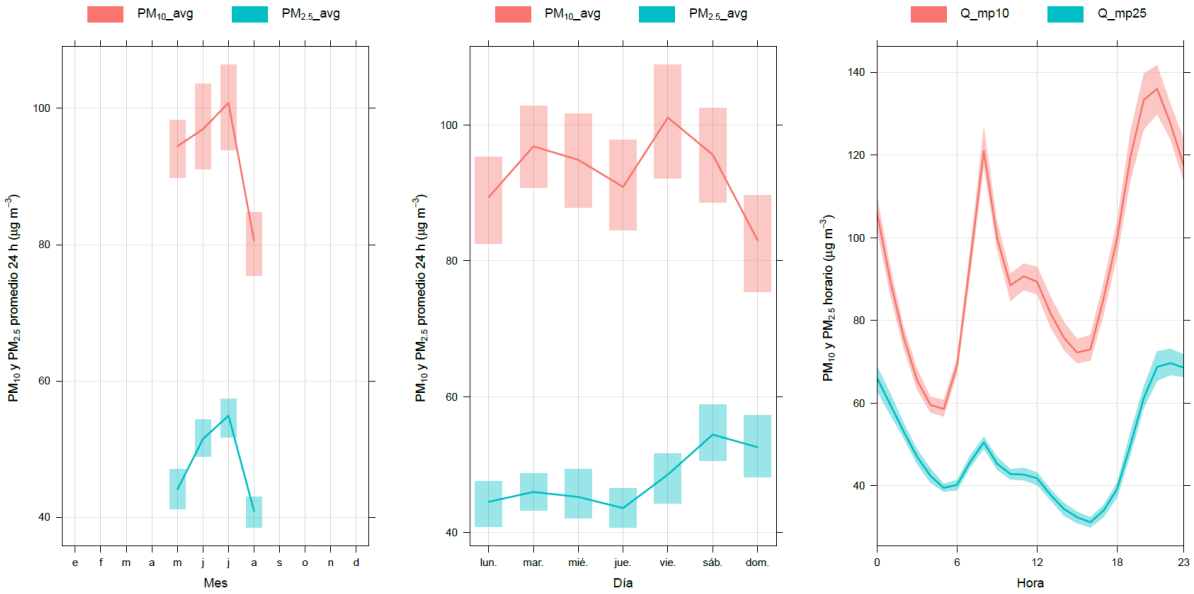

Figura 42: MP10 (rojo) y MP2.5 (celeste) promedio 24 h por mes (izq.), promedio 24 h diario (centro) y horario (der.), estación El Bosque.

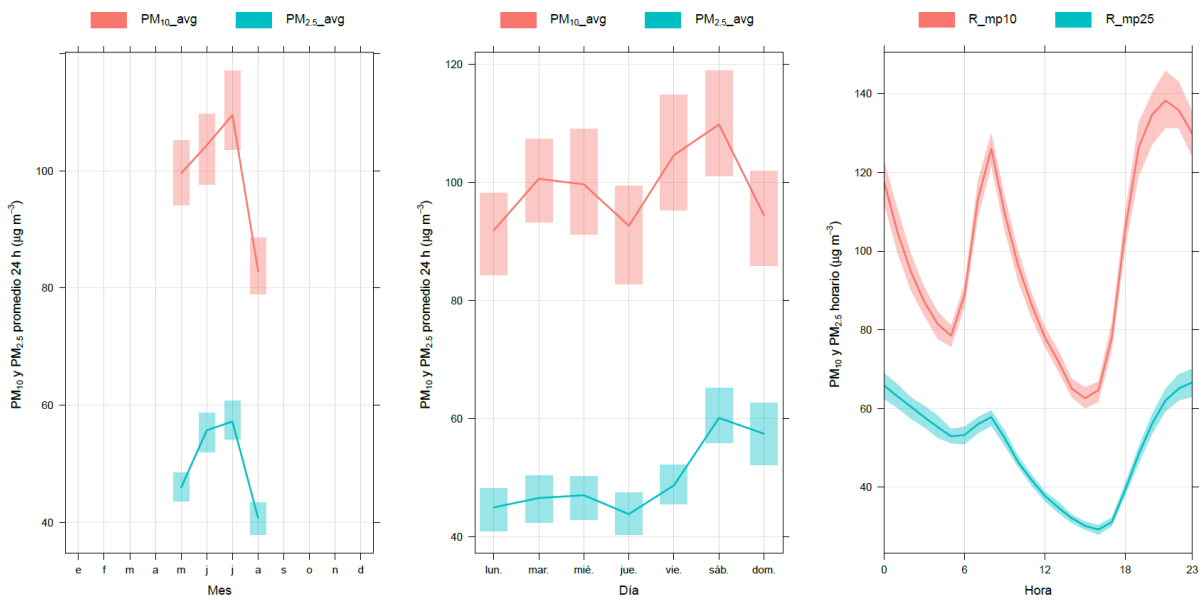

Figura 43: MP10 (rojo) y MP2.5 (celeste) promedio 24 h por mes (izq.), promedio 24 h diario (centro) y horario (der.), estación Cerro Navia.

Se puede apreciar un comportamiento similar en todas las estaciones a excepción de Las Condes debido a que, como se mencionó anteriormente, el ciclo de la velocidad del viento en las distintas estaciones está influenciado por la topografía local, en este caso la mayor altura a la que se encuentra con respecto a las demás estaciones (Alvarado, 2010). Durante el mes de julio se observan los niveles más altos de MP2.5, coincidiendo con la presencia de las temperaturas más bajas en la ciudad durante ese periodo, mientras que mayo y agosto son meses en donde el nivel promedio de MP2.5 desciende, los cuales a su vez presentan días más cálidos dentro de los considerados en el periodo GEC.

En el general de las estaciones, el MP2.5 desciende a medida que va amaneciendo y las temperaturas van subiendo, con un nuevo incremento en las concentraciones de contaminante alrededor de las 8 de la mañana, debido posiblemente a factores antrópicos como un mayor tránsito vehicular durante los días laborales. Las concentraciones vuelven a disminuir después de esta hora manteniendo esa tendencia hasta las 5 de la tarde, en donde el MP2.5 vuelve a aumentar con la disminución de la temperatura en la ciudad al atardecer y posiblemente a actividades antrópicas por el comienzo de la hora punta, teniendo un *peak* entre las 8 y 11 de la noche. El incremento de MP2.5 en horas de la noche y durante los fines de semana, periodos en los cuales en general los habitantes de la ciudad pasan más tiempo en sus hogares, puede deberse posiblemente a emisiones distintas al tránsito vehicular, como la quema de biomasa residencial (madera).

Una forma sencilla de verificar que el MP2.5 ambiental está controlado por la quema de leña, es observar los perfiles diurnos de MP2.5 y verificar si el valor máximo es tarde en la noche y, además, es más alto que el *peak* que se presenta en horas de la mañana (Jorquera, 2021).

4.5.- EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE PRONÓSTICO DE CALIDAD DEL AIRE

La evaluación de las condiciones observadas y las pronosticadas por los modelos oficiales, Cassmassi 1 para MP10 y WRF para MP2.5, se resume en las tablas de contingencia a continuación. Para realizar una evaluación más detallada, además del Porcentaje de Acierto Total se incluyen otros indicadores como el Porcentaje de Falsas Alarmas (FA) y el Porcentaje de Episodios No Alertados (ENA) por los modelos.

4.5.1.- TABLAS DE CONTINGENCIA CON RESÚMENES DE PRONÓSTICO DE CALIDAD DEL AIRE PARA MODELO CASSMASSI 1, MP10

En la Tabla 6 se pueden apreciar los aciertos del Modelo Cassmassi 1 durante el periodo GEC del año 2020 para MP10. El acierto para los casos de Bueno a Regular fue de un 96.6%, mientras que los casos de Alerta alcanzaron un 50% y las Preemergencias un 0% de acierto. El acierto total fue de un 95%.

Tabla 6: Evaluación de la condición relevante considerando Modelo Cassmassi Oficial (MP10), año 2020.

	Observado					
Pronosticado	**Bueno a Regular**	**Alerta**	**Preemergencia**	**Emergencia**	TOTAL	% Acierto
Bueno a Regular	114	1	1	0	**116**	98.3%
Alerta	4	1	0	0	**5**	20.0%
Preemergencia	0	0	0	0	**0**	-
Emergencia	0	0	0	0	**0**	-
TOTAL	**118**	**2**	**1**	**0**	**121**	
% Acierto	96.6%	50.0%	0.0%	-		

N° Aciertos	115	**FA**	80.0%
% Acierto Total	**95.0%**	**ENA**	66.7%

La Tabla 7 considera la evaluación del modelo Cassmassi oficial con sólo dos categorías: No Episodio (Bueno y Regular) y Episodio (Alerta, Preemergencia y Emergencia). Durante 2020, para los casos de No Episodio se obtuvo un 96.6% de aciertos, mientras que para los Episodios se alcanzó un 33.3%. El acierto total fue de un 95%.

Tabla 7: Evaluación por ocurrencia de episodio crítico considerando Modelo Cassmassi Oficial (MP10), año 2020.

	Observado			
Pronosticado	**NO EPISODIO**	**EPISODIO**	TOTAL	% Acierto
NO EPISODIO	114	2	116	98.3%
EPISODIO	4	1	5	20.0%
TOTAL	**118**	**3**	**121**	
% Acierto	96.6%	33.3%		
N° Aciertos	115	**FA**	80.0%	
% Acierto Total	**95.0%**	**ENA**	66.7%	

Con respecto al año 2021, en la Tabla 8 se puede observar que el acierto para los casos de Bueno a Regular fue del 84%, mientras que los casos de Alerta alcanzaron un 23.5% de acierto y las Preemergencias un 0%. El acierto total fue de un 73.9%.

Tabla 8: Evaluación de la condición relevante considerando Modelo Cassmassi Oficial (MP10), año 2021.

	Observado					
Pronosticado	**Bueno a Regular**	**Alerta**	**Preemergencia**	**Emergencia**	TOTAL	% Acierto
Bueno a Regular	84	10	0	0	**94**	89.4%
Alerta	13	4	2	0	**19**	21.1%
Preemergencia	3	3	0	0	**6**	0.0%
Emergencia	0	0	0	0	**0**	-
TOTAL	**100**	**17**	**2**	**0**	**119**	
% Acierto	84.0%	23.5%	0.0%	-		
N° Aciertos	88	**FA**	64.0%			
% Acierto Total	**73.9%**	**ENA**	52.6%			

Como se puede apreciar en la Tabla 9 considerando la evaluación del modelo con sólo dos categorías para el año 2021, para los casos de No Episodios se alcanzó un 84% de acierto, mientras que para los Episodios se obtuvo un 47.4% de acierto. El acierto total fue de un 78.2%.

Tabla 9: Evaluación por ocurrencia de episodio crítico considerando Modelo Cassmassi Oficial (MP10), año 2021.

	Observado			
Pronosticado	**NO EPISODIO**	**EPISODIO**	TOTAL	% Acierto
NO EPISODIO	84	10	94	89.4%
EPISODIO	16	9	25	36.0%
TOTAL	**100**	**19**	**121**	
% Acierto	84.0%	47.4%		
N° Aciertos	93	**FA**	64.0%	
% Acierto Total	**78.2%**	**ENA**	52.6%	

Para el año 2022, en la Tabla 10 se puede apreciar que el acierto para los casos de Bueno a Regular fue del 86%, mientras que los casos de Alerta alcanzaron un 33.3% de acierto y las Preemergencias un 0%. El acierto total fue de un 78.9%.

Tabla 10: Evaluación de la condición relevante considerando Modelo Cassmassi Oficial (MP10), año 2022.

	Observado					
Pronosticado	**Bueno a Regular**	**Alerta**	**Preemergencia**	**Emergencia**	TOTAL	% Acierto
Bueno a Regular	92	8	1	0	**101**	91.1%
Alerta	13	5	0	0	**18**	27.8%
Preemergencia	2	2	0	0	**4**	0.05
Emergencia	0	0	0	0	**0**	-
TOTAL	**107**	**15**	**1**	**0**	**123**	
% Acierto	86.0%	33.3%	0.0%	-		
N° Aciertos	97	**FA**	68.2%			
% Acierto Total	**78.9%**	**ENA**	56.3%			

Como se puede observar en la Tabla 11 considerando la evaluación del modelo con sólo dos categorías para el año 2022, para los casos de No Episodios se alcanzó un 86% de acierto, mientras que para los Episodios se obtuvo un 43.8% de acierto. El acierto total fue de un 80.5%.

Tabla 11: Evaluación por ocurrencia de episodio crítico considerando Modelo Cassmassi Oficial (MP10), año 2022.

	Observado			
Pronosticado	**NO EPISODIO**	**EPISODIO**	TOTAL	% Acierto
NO EPISODIO	92	9	101	91.1%
EPISODIO	15	7	22	31.8%
TOTAL	**107**	**17**	**123**	
% Acierto	86.0%	43.8%		
N° Aciertos	99	**FA**	68.2%	
% Acierto Total	**80.5%**	**ENA**	56.3%	

Analizando en conjunto los tres años considerados para la evaluación del modelo, se puede observar que el modelo Cassmassi 1 predijo de mejor manera la ocurrencia de no episodios (o condición “más normal”); sin embargo, tuvo un 0% de acierto en Preemergencias. Además, se puede apreciar una tendencia a sobre estimar del modelo evidenciado en que más del 60% de los episodios predichos en cada año fueron falsas alarmas. Los episodios no alertados en cada año superan el 50%, lo que puede ser debido principalmente a que al modelo no se le pueden incorporar inventarios de emisiones y las concentraciones de MP10 no dependen solamente de las condiciones meteorológicas, sino que también de las emisiones (Abarca & Hidalgo, 2019).

La Tabla 12 considera la evaluación del modelo Cassmassi oficial con respecto a cada mes del periodo GEC y con sólo dos categorías: No Episodio (NE) y Episodio (E). Se puede apreciar que julio fue un mes difícil de predecir debido posiblemente a ser el mes más frío del año y, por lo tanto, con menor ventilación, sumado al posible aumento en el uso de calefacción a leña en los hogares.

Tabla 12: Porcentaje de acierto por mes Modelo Cassmassi Oficial (MP10).

	2020		2021		2022		% Promedio	
MES	**NE**	**E**	**NE**	**E**	**NE**	**E**	**NE**	**E**
Mayo	100%	0%	92%	40%	88%	40%	**93%**	**27%**
Junio	100%	-	96%	40%	91%	43%	**96%**	**42%**
Julio	97%	50%	74%	42%	85%	20%	**85%**	**37%**
Agosto	97%	-	92%	0%	100%	20%	**96%**	**10%**

La Tabla 13 considera la evaluación del modelo Cassmassi oficial con respecto a cada día de la semana y con sólo dos categorías (No Episodio y Episodio). Se puede observar que los fines de semana y el lunes fueron los días más difíciles de predecir para el modelo, debido posiblemente a la emisión de material particulado por parte de la quema de madera en los hogares durante el fin de semana y al mayor flujo vehicular los lunes por la mañana.

Tabla 13: Porcentaje de acierto por día Modelo Cassmassi Oficial (MP10).

	2020		2021		2022		% Promedio	
DÍA	**NE**	**E**	**NE**	**E**	**NE**	**E**	**NE**	**E**
L	100%	0%	100%	20%	100%	0%	**100%**	**7%**
M	100%	0%	100%	40%	87%	0%	**96%**	**13%**
W	94%	-	100%	67%	87%	67%	**94%**	**67%**
J	100%	50%	86%	33%	100%	0%	**95%**	**28%**
V	100%	0%	88%	0%	88%	100%	**92%**	**33%**
S	94%	-	79%	0%	92%	20%	**88%**	**10%**
D	100%	-	77%	75%	85%	60%	**57%**	**68%**

4.5.2.- TABLAS DE CONTINGENCIA CON RESÚMENES DE PRONÓSTICO DE CALIDAD DEL AIRE PARA MODELO WRF, MP2.5

En la Tabla 14 se pueden apreciar los aciertos del Modelo WRF durante el periodo GEC del año 2020 para MP2.5. El acierto para los casos de Bueno a Regular fue de un 80.8%, mientras que los casos de Alerta alcanzaron un 6.7% y las Preemergencias un 50% de acierto. El acierto total fue de un 71.1%.

Tabla 14: Evaluación de la condición relevante considerando Modelo WRF Oficial (MP2.5), año 2020.

	Observado					
Pronosticado	**Bueno a Regular**	**Alerta**	**Preemergencia**	**Emergencia**	TOTAL	% Acierto
Bueno a Regular	84	5	1	0	**90**	93.3%
Alerta	12	1	0	0	**13**	7.7%
Preemergencia	8	5	1	0	**14**	7.1%
Emergencia	0	4	0	0	**4**	0.0%
TOTAL	**104**	**15**	**2**	**0**	**121**	
% Acierto	80.8%	6.7%	50%	-		

N° Aciertos	86	**FA**	64.5%
% Acierto Total	**71.1%**	**ENA**	35.3%

Como se puede apreciar en la Tabla 15 considerando la evaluación del modelo con sólo dos categorías para el año 2020, para los casos de No Episodios se alcanzó un 80.8% de acierto, mientras que para los Episodios se obtuvo un 64.7% de acierto. El acierto total fue de un 78.5%.

Tabla 15: Evaluación por ocurrencia de episodio crítico considerando Modelo WRF Oficial (MP2.5), año 2020.

	Observado			
Pronosticado	**NO EPISODIO**	**EPISODIO**	TOTAL	% Acierto
NO EPISODIO	84	6	90	93.3%
EPISODIO	20	11	31	35.5%
TOTAL	**104**	**17**	**121**	
% Acierto	80.8%	64.7%		
N° Aciertos	95	**FA**	64.5%	
% Acierto Total	**78.5%**	**ENA**	35.3%	

Con respecto al año 2021, en la Tabla 16 se puede observar que el acierto para los casos de Bueno a Regular fue del 81.9%, mientras que los casos de Alerta alcanzaron un 42.9% de acierto y las Preemergencias un 46.7%. El acierto total fue de un 70.6%.

Tabla 16: Evaluación de la condición relevante considerando Modelo WRF Oficial (MP2.5), año 2021.

	Observado					
Pronosticado	**Bueno a Regular**	**Alerta**	**Preemergencia**	**Emergencia**	TOTAL	% Acierto
Bueno a Regular	68	6	4	0	**78**	87.2%
Alerta	9	9	1	0	**19**	47.4%
Preemergencia	6	6	7	0	**19**	36.8%
Emergencia	0	0	3	0	**3**	0.0%
TOTAL	**83**	**21**	**15**	**0**	**119**	
% Acierto	81.9%	42.9%	46.7%	-		
N° Aciertos	84	**FA**	36.6%			
% Acierto Total	**70.6%**	**ENA**	27.8%			

Como se puede apreciar en la Tabla 17 considerando la evaluación del modelo con sólo dos categorías para el año 2021, para los casos de No Episodios se alcanzó un 81.9% de acierto, mientras que para los Episodios se obtuvo un 72.2% de acierto. El acierto total fue de un 79%.

Tabla 17: Evaluación por ocurrencia de episodio crítico considerando Modelo WRF Oficial (MP2.5), año 2021.

	Observado			
Pronosticado	**NO EPISODIO**	**EPISODIO**	TOTAL	% Acierto
NO EPISODIO	68	10	78	87.2%
EPISODIO	15	26	41	63.4%
TOTAL	**83**	**36**	**119**	
% Acierto	81.9%	72.2%		
N° Aciertos	94	**FA**	36.6%	
% Acierto Total	**79.0%**	**ENA**	27.8%	

Para el año 2022, en la Tabla 18 se puede apreciar que el acierto para los casos de Bueno a Regular fue del 86.5%, mientras que los casos de Alerta alcanzaron un 61.5% de acierto y las Preemergencias un 0%. El acierto total fue de un 79.7%.

Tabla 18: Evaluación de la condición relevante considerando Modelo WRF Oficial (MP2.5), año 2022.

	Observado					
Pronosticado	**Bueno a Regular**	**Alerta**	**Preemergencia**	**Emergencia**	TOTAL	% Acierto
Bueno a Regular	90	3	0	0	**93**	96.8%
Alerta	9	8	0	0	**17**	47.1%
Preemergencia	5	2	0	0	**7**	0.0%
Emergencia	0	0	6	0	**6**	0.0%
TOTAL	**104**	**13**	**6**	**0**	**123**	
% Acierto	86.5%	61.5%	0.0%	-		
N° Aciertos	98	**FA**	46.7%			
% Acierto Total	**79.7%**	**ENA**	15.8%			

Como se puede observar en la Tabla 19 considerando la evaluación del modelo con sólo dos categorías para el año 2022, para los casos de No Episodios se alcanzó un 86.5% de acierto, mientras que para los Episodios se obtuvo un 84.2% de acierto. El acierto total fue de un 86.2%.

Tabla 19: Evaluación por ocurrencia de episodio crítico considerando Modelo WRF Oficial (MP2.5), año 2022.

	Observado			
Pronosticado	**NO EPISODIO**	**EPISODIO**	TOTAL	% Acierto
NO EPISODIO	90	3	93	96.8%
EPISODIO	14	16	30	53.3%
TOTAL	**104**	**19**	**123**	
% Acierto	86.5%	84.2%		
N° Aciertos	106	**FA**	46.7%	
% Acierto Total	**86.2%**	**ENA**	15.8%	

Analizando en conjunto los tres años considerados para la evaluación del modelo, se puede observar que el modelo WRF predijo de mejor manera la ocurrencia de no episodios (o condición “más normal”) con respecto a la ocurrencia de episodios; sin embargo, tuvo un acierto total mayor al 70% en la predicción de estos. Los episodios no alertados entre estos tres años son menores al 27%, lo que puede ser debido principalmente a que en este modelo se pueden utilizar datos de entrada como inventarios de emisiones de gases y aerosoles (naturales y antropogénicos) (Lopez-Noreña et al., 2019).

La Tabla 20 considera la evaluación del modelo WRF oficial con respecto a cada mes del periodo GEC y con sólo dos categorías (No Episodio y Episodio). A diferencia del modelo Cassmassi 1, el modelo WRF pudo predecir más del 38% de los Episodios ocurridos por mes.

Tabla 20: Porcentaje de acierto por mes Modelo WRF Oficial (MP2.5).

	2020		2021		2022		% Promedio	
MES	**NE**	**E**	**NE**	**E**	**NE**	**E**	**NE**	**E**
Mayo	96%	0%	100%	67%	92%	80%	**96%**	**49%**
Junio	94%	23%	88%	43%	100%	71%	**94%**	**46%**
Julio	80%	64%	69%	78%	95%	22%	**81%**	**55%**
Agosto	100%	50%	85%	67%	100%	0%	**95%**	**39%**

La Tabla 21 considera la evaluación del modelo WRF oficial con respecto a cada día de la semana y con sólo dos categorías (No Episodio y Episodio). A diferencia del modelo Cassmassi 1, el modelo WRF fue capaz de predecir más de la mitad de las Emergencias ocurridas los fines de semana y lunes.

Tabla 21: Porcentaje de acierto por día Modelo WRF Oficial (MP2.5).

	2020		2021		2022		% Promedio	
DÍA	NE	E	NE	E	NE	E	NE	E
L	100%	33%	100%	88%	100%	57%	**100%**	**59%**
M	92%	25%	100%	43%	100%	50%	**97%**	**39%**
W	94%	100%	91%	17%	94%	0%	**93%**	**39%**
J	88%	0%	92%	75%	100%	0%	**93%**	**25%**
V	100%	20%	85%	75%	100%	67%	**95%**	**54%**
S	91%	43%	71%	75%	100%	50%	**87%**	**56%**
D	90%	43%	78%	75%	82%	71%	**83%**	**63%**

4.6.- ANÁLISIS DE EPISODIOS CRÍTICOS NO DECLARADOS

Tras el análisis realizado en la sección anterior, queda en evidencia que tanto el modelo Cassmassi 1 para el pronóstico de MP10 y WRF para el pronóstico de MP2.5 han fallado en ciertas ocasiones, prediciendo la ocurrencia de un evento de características REGULAR cuando en la práctica resulta ser de carácter ALERTA o PREEMERGENCIA.

Como reportan los estudios de Koutrakis et al. (2005) y Yañez et al. (2007), la dirección y velocidad del viento, y el porcentaje de humedad relativa son factores meteorológicos fundamentales en el comportamiento de la concentración de contaminantes. A modo de ejemplo, en la Figura 44, correspondiente a una Preemergencia de MP10 y MP2.5 del año 2021, es posible evidenciar que, en la madrugada del día de la preemergencia, hay presencia predominante de vientos provenientes desde el este, aunque de baja intensidad. Respecto al porcentaje de humedad relativa observados en las Figuras 45 y 46, presentan un porcentaje superior al 80%, el cual disminuye a medida que se avanzan las horas diurnas, producto de la salida del sol y el calentamiento que este genera. No obstante, en todas las figuras recién mencionadas se observa que, a pesar de ser factores meteorológicos distintos, los niveles de contaminante ya presentan un alto valor proveniente del día anterior.

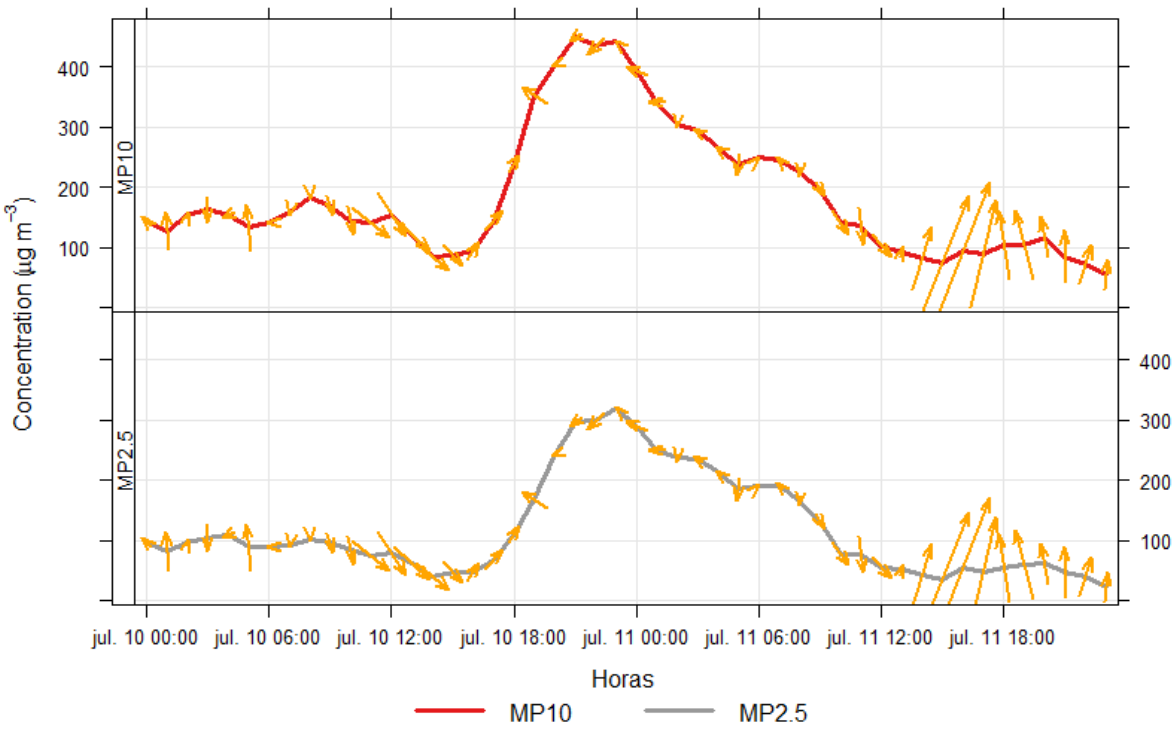

Figura 44: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia día 10-07-2021 y Preemergencia 11-07-2021.

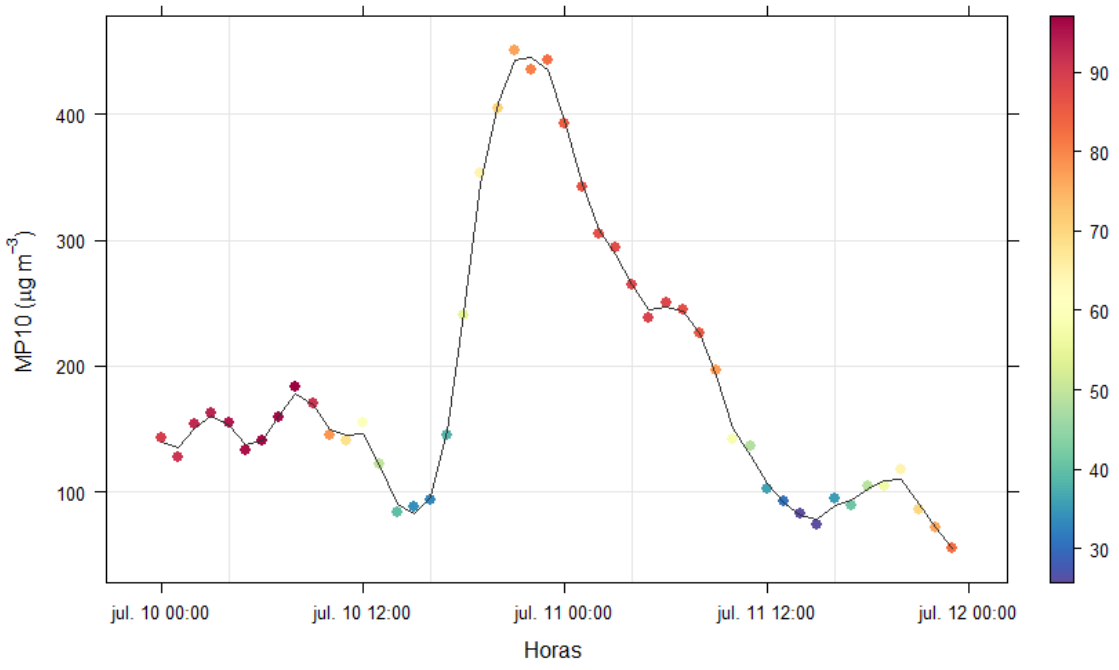

Figura 45: Porcentaje de humedad relativa y concentración de MP10 en Cerro Navia día 10-07-2021 y Preemergencia 11-07-2021.

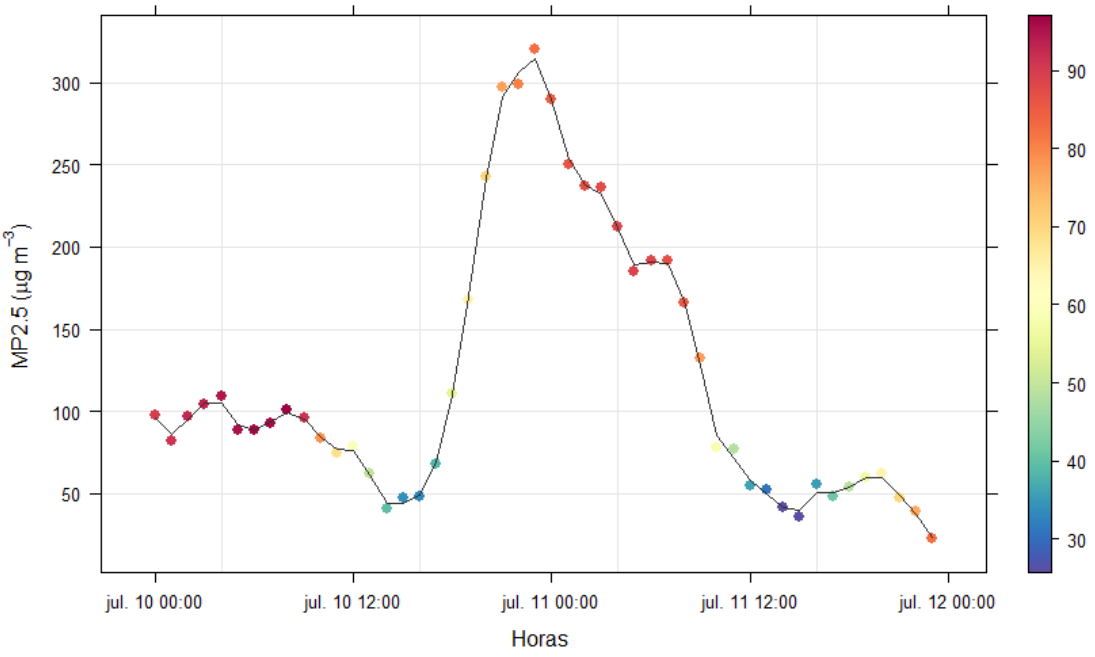

Figura 46: Porcentaje de humedad relativa y concentración de MP2.5 día 10-07-2021 y Preemergencia 11-07-2021.

El comportamiento del viento como del porcentaje de humedad relativa pueden ser claves para predecir la ocurrencia de un evento crítico. Dicho esto, es pertinente realizar un análisis a estos mismos factores, pero incluyendo el día anterior y el mismo día de los eventos no declarados, mostrados en la Tabla 22 a continuación.

Tabla 22: Eventos No Declarados clasificados por año y contaminante.

Año	MP10	MP2.5
2020	-	27-06 23-07 25-07
2021	-	19-06 13-07 06-08 13-08
2022	29-06	-

4.6.1.- EVENTOS CRÍTICOS NO DECLARADOS MP10

En cuanto a los eventos críticos no declarados de MP10, en el día 29-06-2022 y tras lo observado en las Figura 47 y Figura 48, los niveles de contaminación por MP10 aumentaron cuando la velocidad del viento disminuye desde las 18:00 h del día anterior al evento crítico. Este fenómeno se puede tanto inferir como comprobar, ya que según Koutrakis et al. (2005), los niveles de contaminación disminuyen cuando aumenta la velocidad del viento, lo cual se observa en el transcurso del día crítico desde las 12:00 h. Por otra parte, se pude inferir el suceso desde otra perspectiva, es decir, al evidenciar en el día anterior un aumento de contaminación cuando disminuye la velocidad del viento.

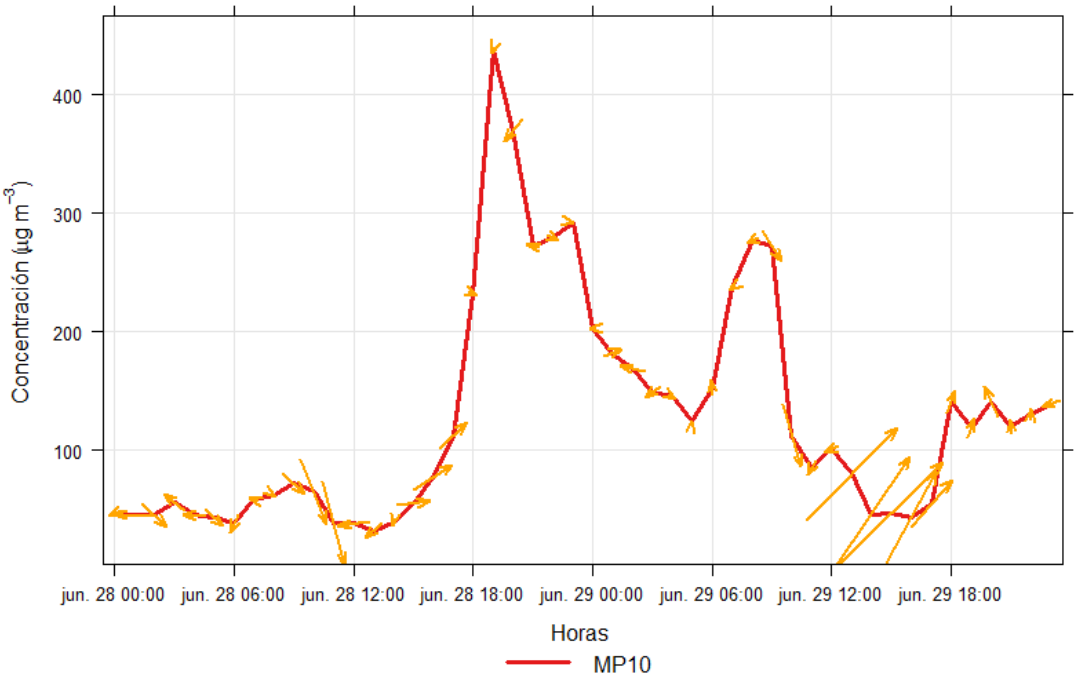

Figura 47: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia entre los días 28-06-2022 y 29-06-2022.

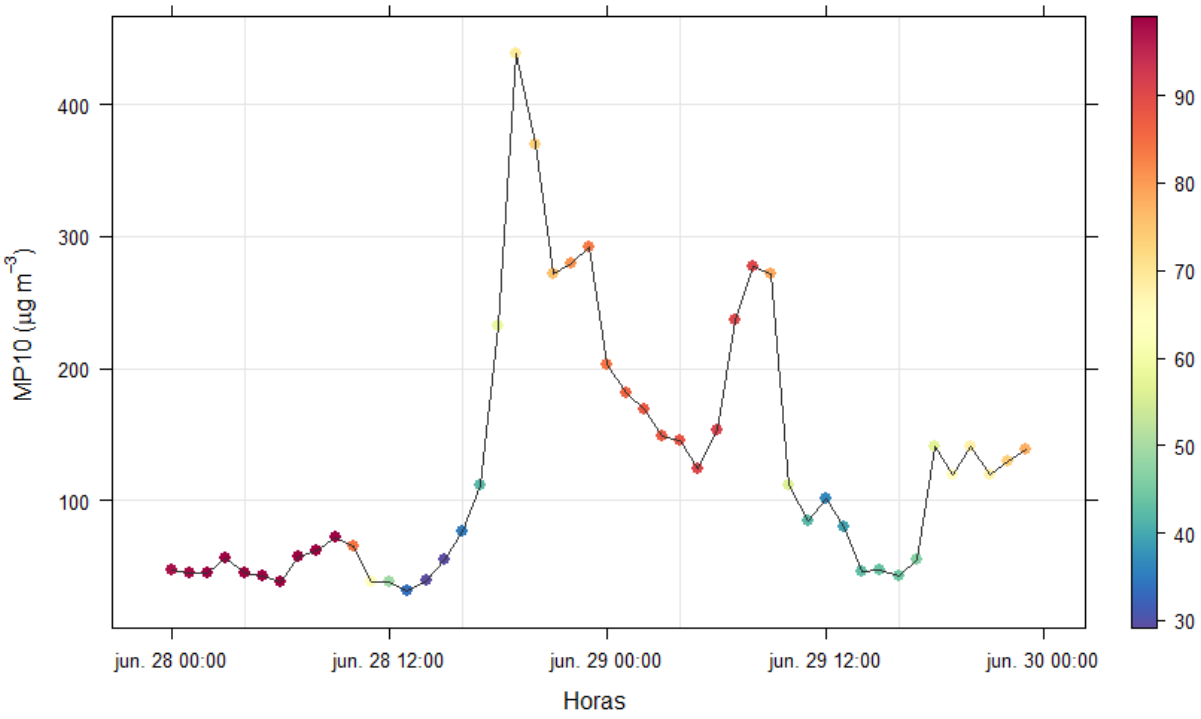

Figura 48: Porcentaje de humedad relativa en Cerro Navia entre los días 28-06-2022 y 29-06-2022.

4.6.2.- EVENTOS NO DECLARADOS MP2.5

En cuanto a los eventos críticos no declarados de MP2.5, en el día 27-06-2020 y tras lo observado en las Figura 49 y Figura 50, la distribución de vientos es muy heterogénea en cuanto a dirección como para afirmar su incidencia sobre un eventual evento crítico al día siguiente. No obstante, se observa una disminución en la velocidad desde las 18:00 h del día anterior al evento crítico. Por otro lado, el porcentaje de humedad relativa es relevante, ya que el día anterior al evento crítico no declarado se observan porcentajes de humedad relativa de aproximadamente 40%, es decir, menor al 65%, lo que resulta en aumento de concentraciones de MP2.5 (Yáñez et al., 2017).

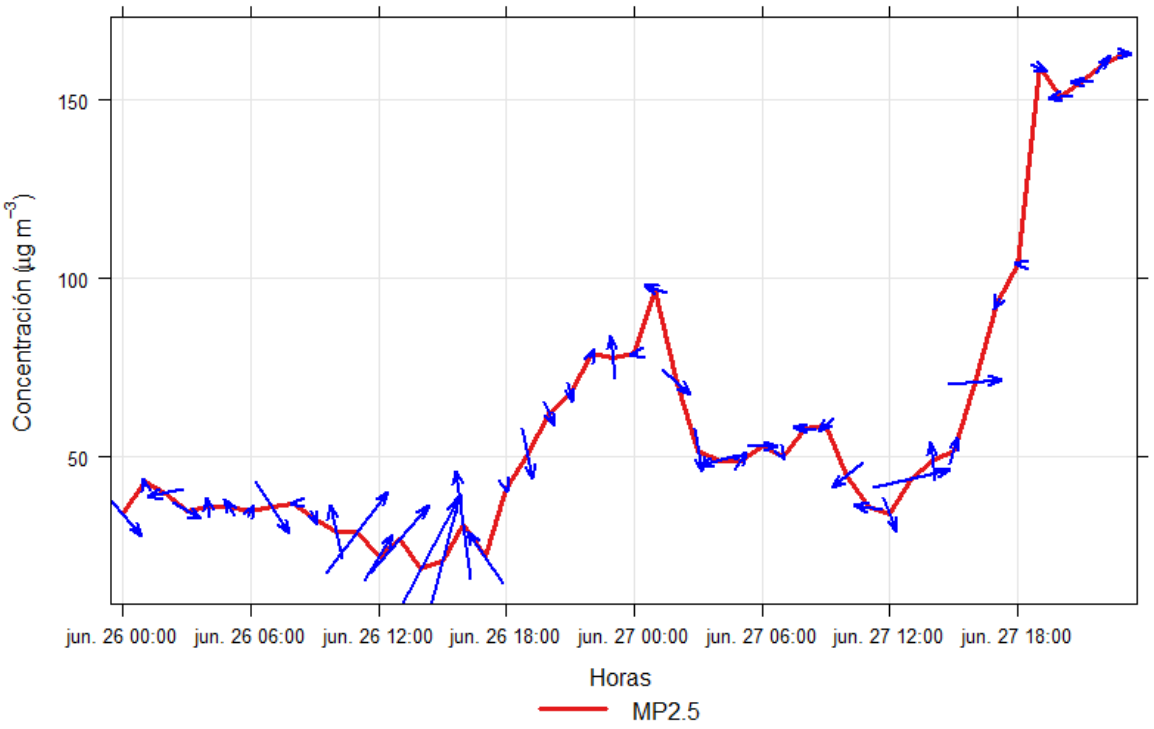

Figura 49: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia entre los días 26-06-2020 y 27-06-2020.

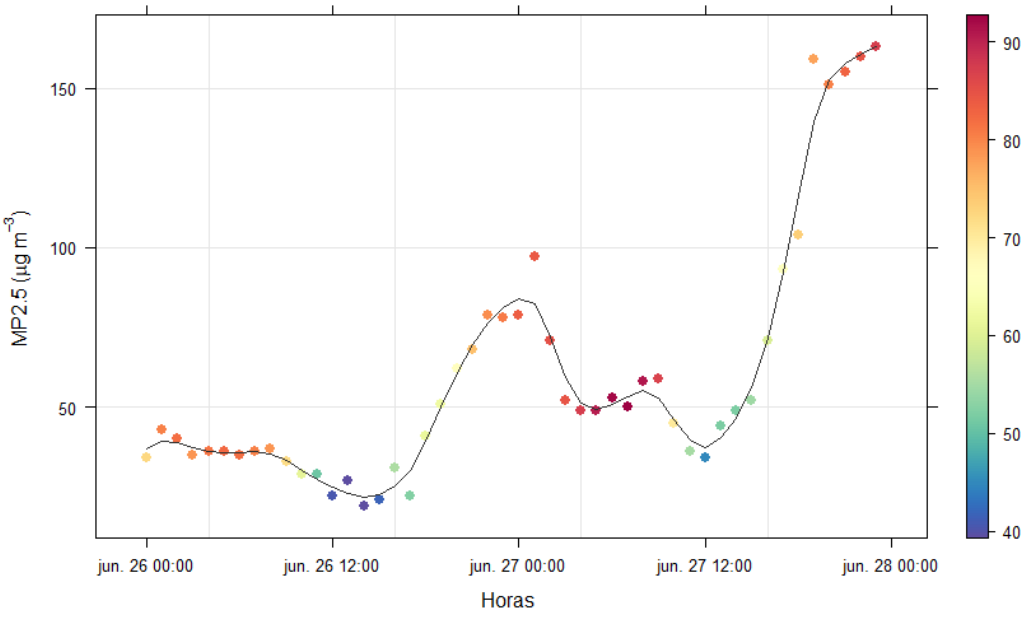

Figura 50: Porcentaje de humedad relativa en Cerro Navia entre los días 26-06-2020 y 27-06-2020.

El evento crítico no declarado del día 23-07-2020, pese a presentar pérdida de datos en las Figura 51 y Figura 52, se observa un aumento de la concentración de MP2.5 cuando la velocidad del viento disminuye desde el día anterior. Además, al igual que el anterior evento crítico no declarado, el porcentaje de humedad relativa es bajo el 65%.

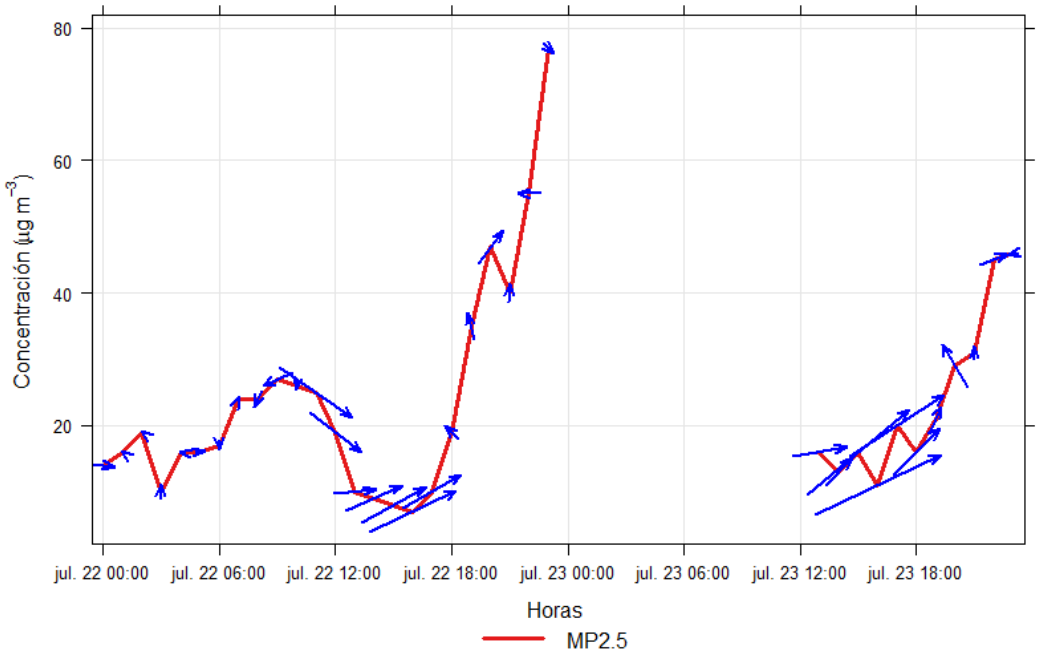

Figura 51: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia entre los días 22-07-2020 y 23-07-2020.

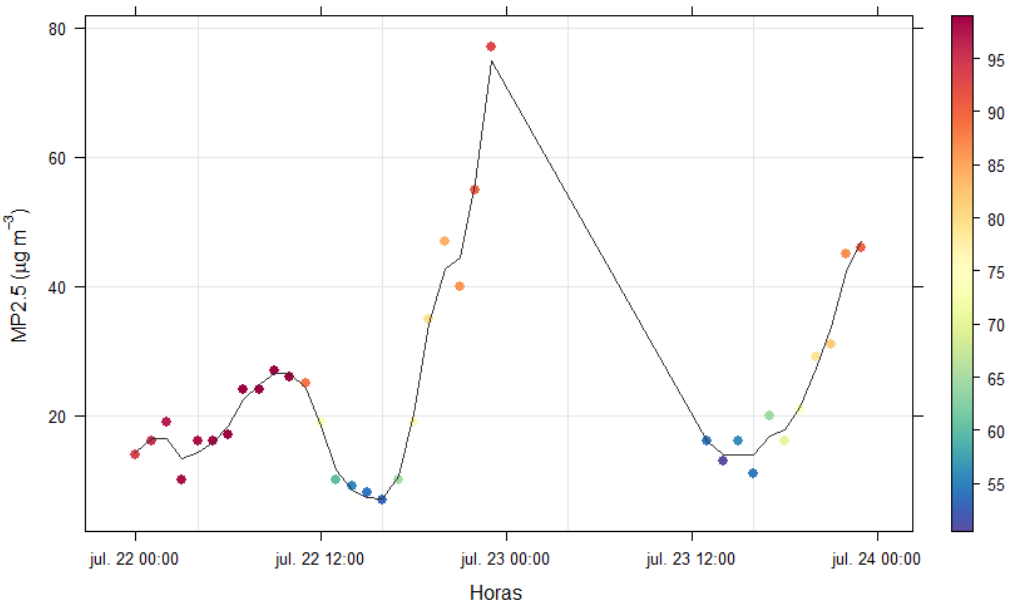

Figura 52: Porcentaje de humedad relativa en Cerro Navia entre los días 22-07-2020 y 23-07-2020.

El evento crítico no declarado del día 25-07-2020, representado en las Figura 53 y Figura 54, presenta una disminución en la velocidad del viento desde las 18:00 h del día anterior, con una dirección predominante desde el este. Respecto al porcentaje de humedad relativa, presenta un valor bajo el 40% a las 16:00 h.

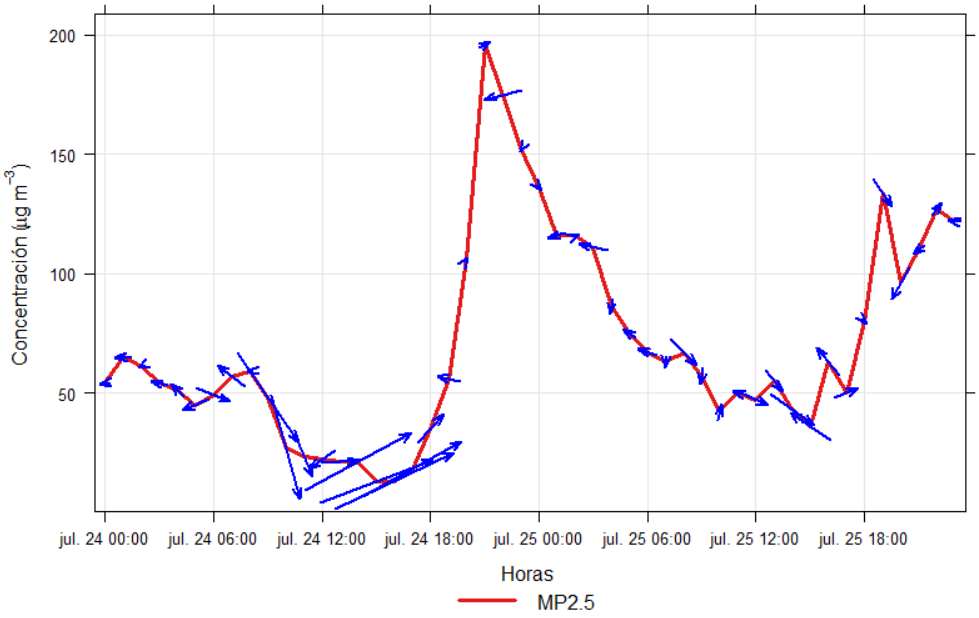

Figura 53: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia entre los días 24-07-2020 y 25-07-2020.

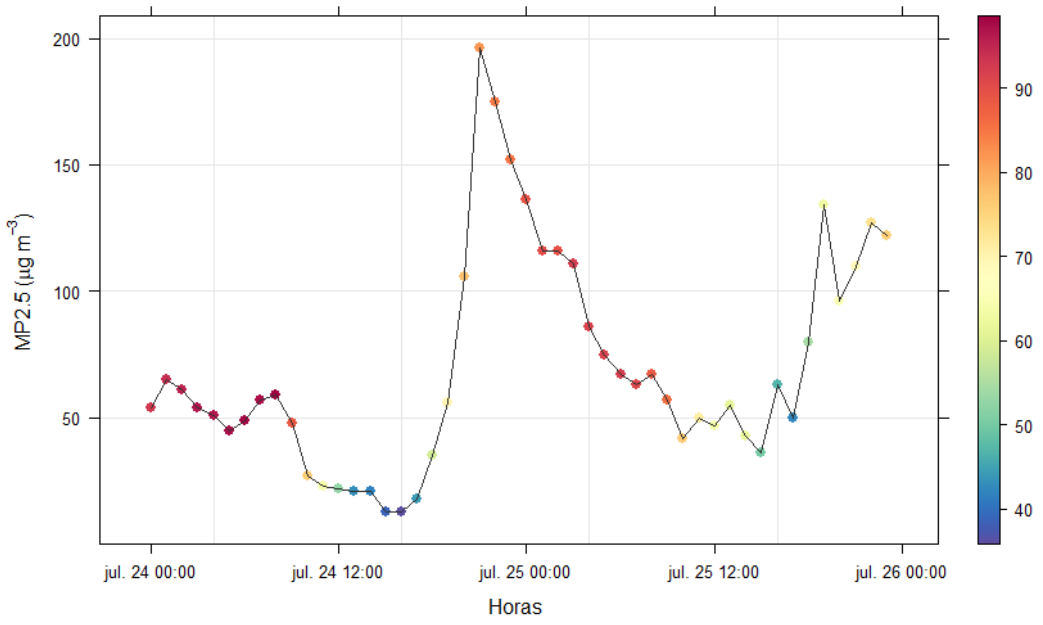

Figura 54: Porcentaje de humedad relativa en Cerro Navia entre los días 24-07-2020 y 25-07-2020.

El evento crítico no declarado del día 19-06-2021, en las Figura 55 y Figura 56, es debido principalmente a un *peak* presentado a últimas horas del día, donde de igual manera, una disminución en la velocidad del viento y en el porcentaje de la humedad relativa son precursores de dicho evento crítico.

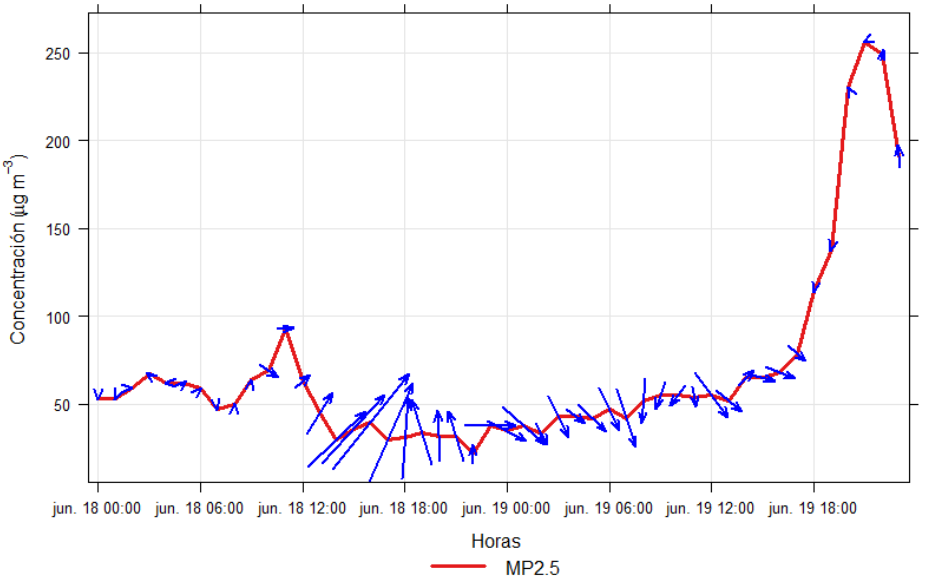

Figura 55: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia entre los días 18-06-2021 y 19-06-2021.

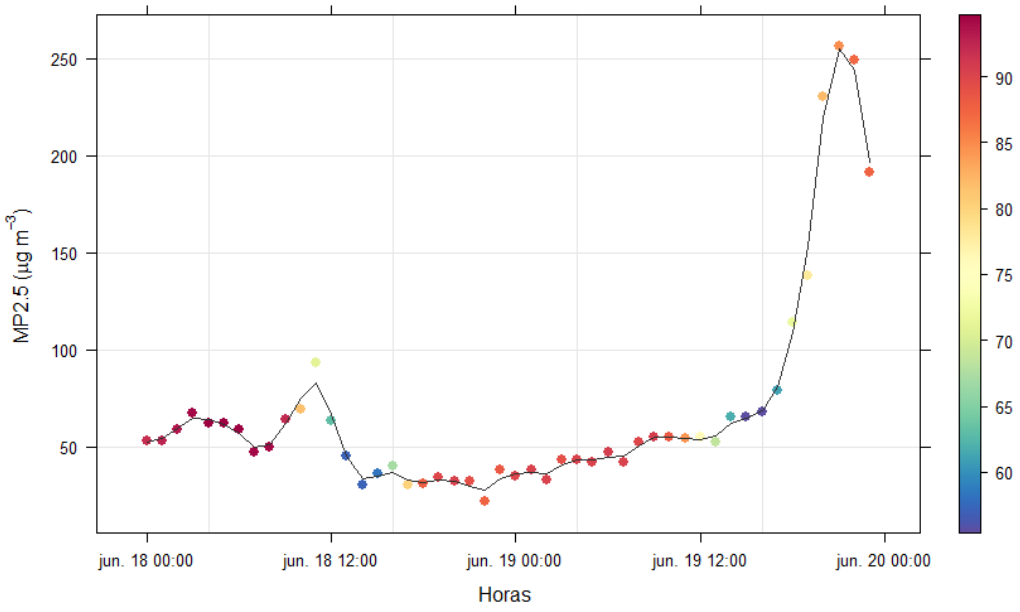

Figura 56: Porcentaje de humedad relativa en Cerro Navia entre los días 18-06-2020 y 19-06-2020.

Los eventos críticos no declarados de los días 13-07-2021, 06-08-2021 y 13-08-2022 desde las Figuras 57 a 62, presenta anomalías en cuanto a los patrones horarios previamente descritos, sin embargo, es posible evidenciar siempre una disminución de la contaminación atmosférica.

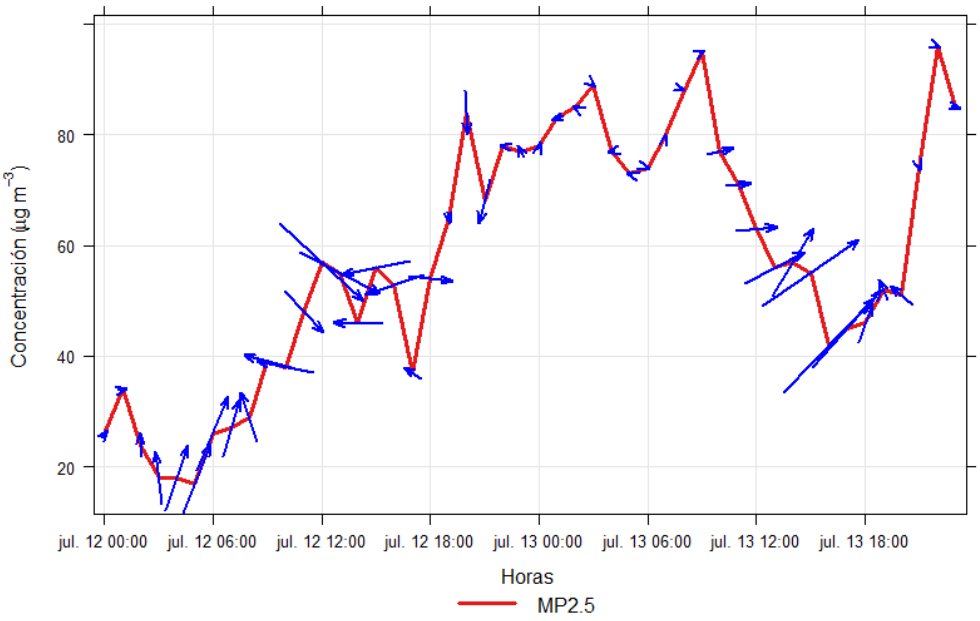

Figura 57: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia entre los días 12-07-2021 y 13-07-2021.

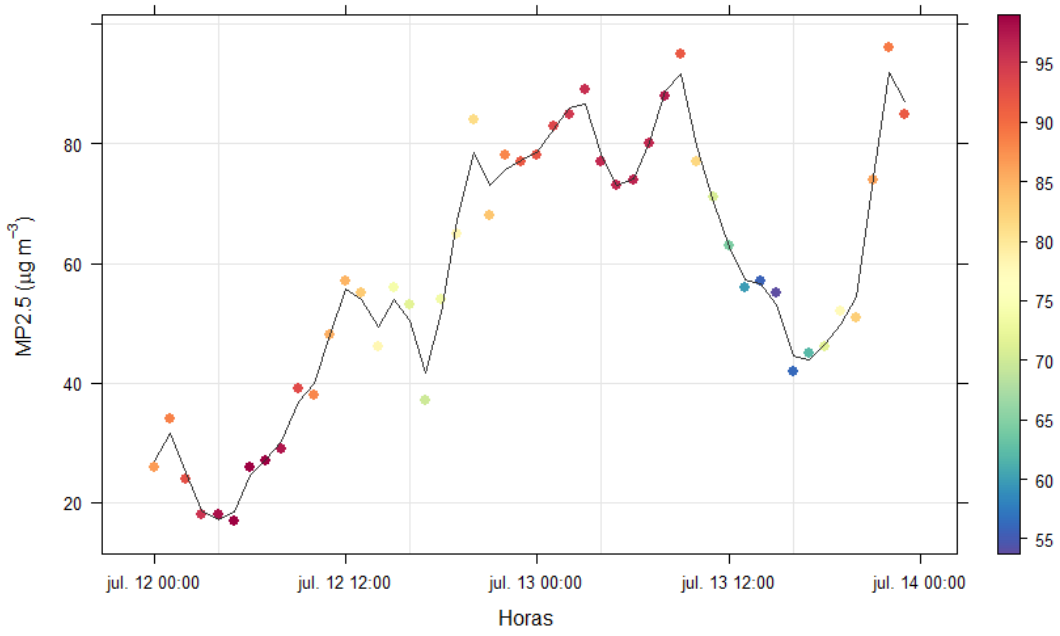

Figura 58: Porcentaje de humedad relativa en Cerro Navia entre los días 12-07-2021 y 13-07-2021.

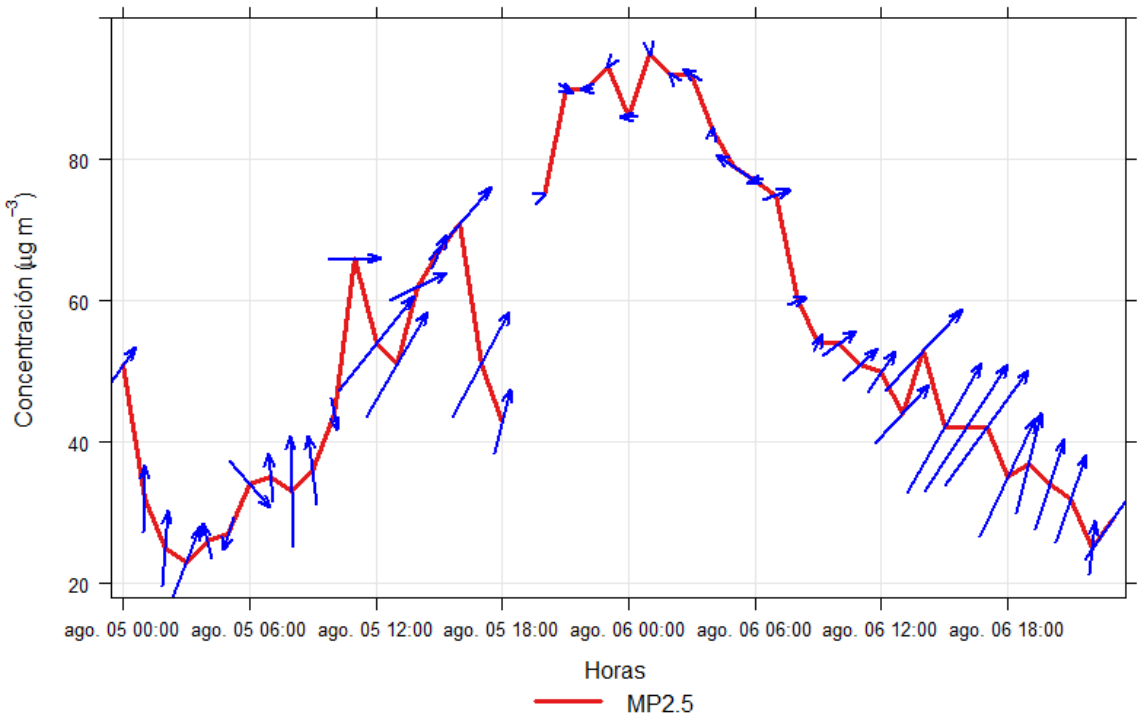

Figura 59: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia entre los días 05-08-2021 y 06-08-2021.

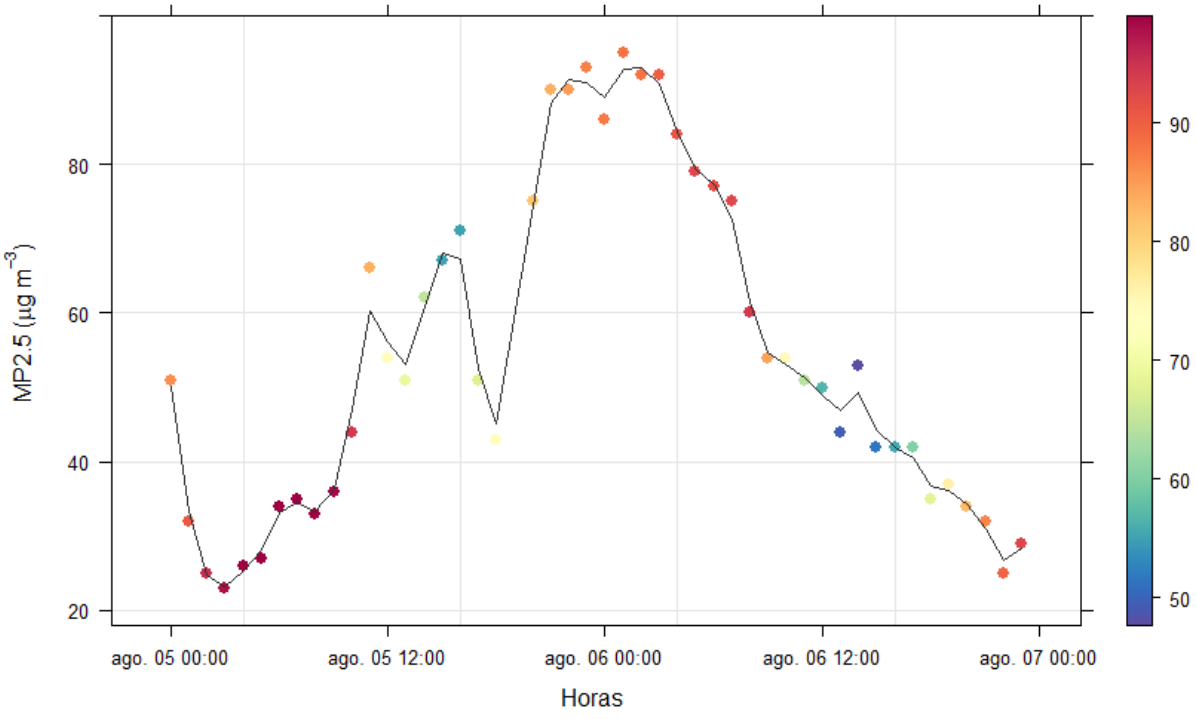

Figura 60: Porcentaje de humedad relativa en Cerro Navia entre los días 05-08-2021 y 06-08-2021.

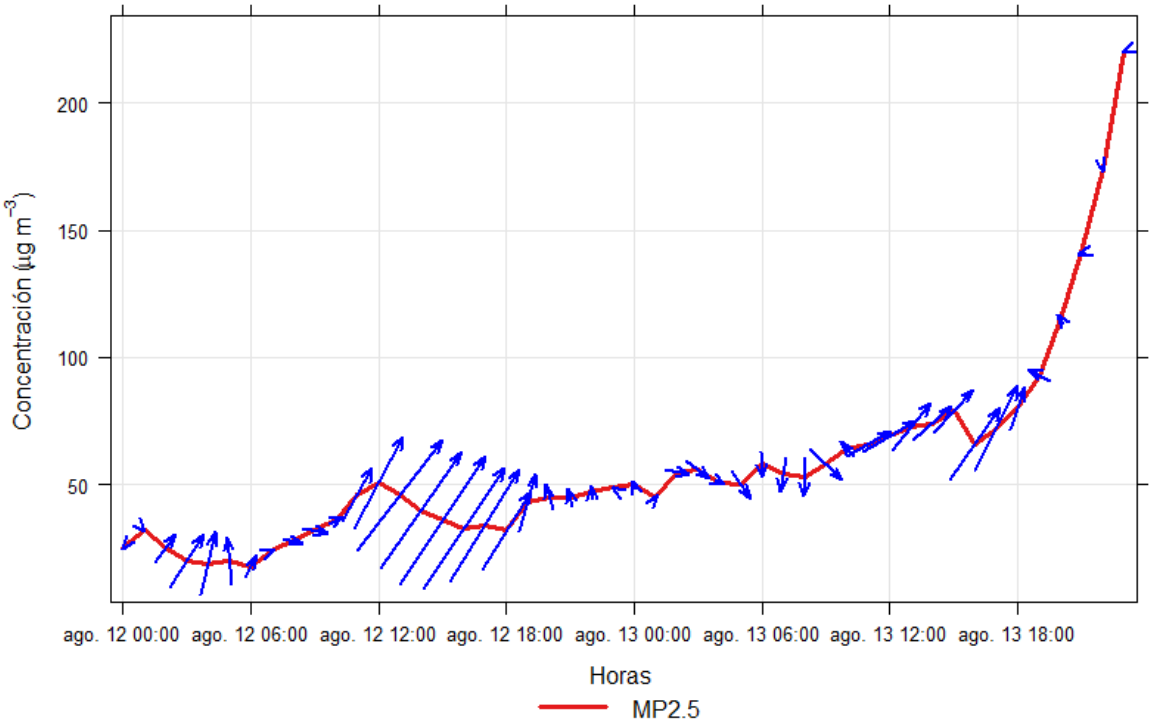

Figura 61: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia entre los días 12-08-2021 y 13-08-2021.

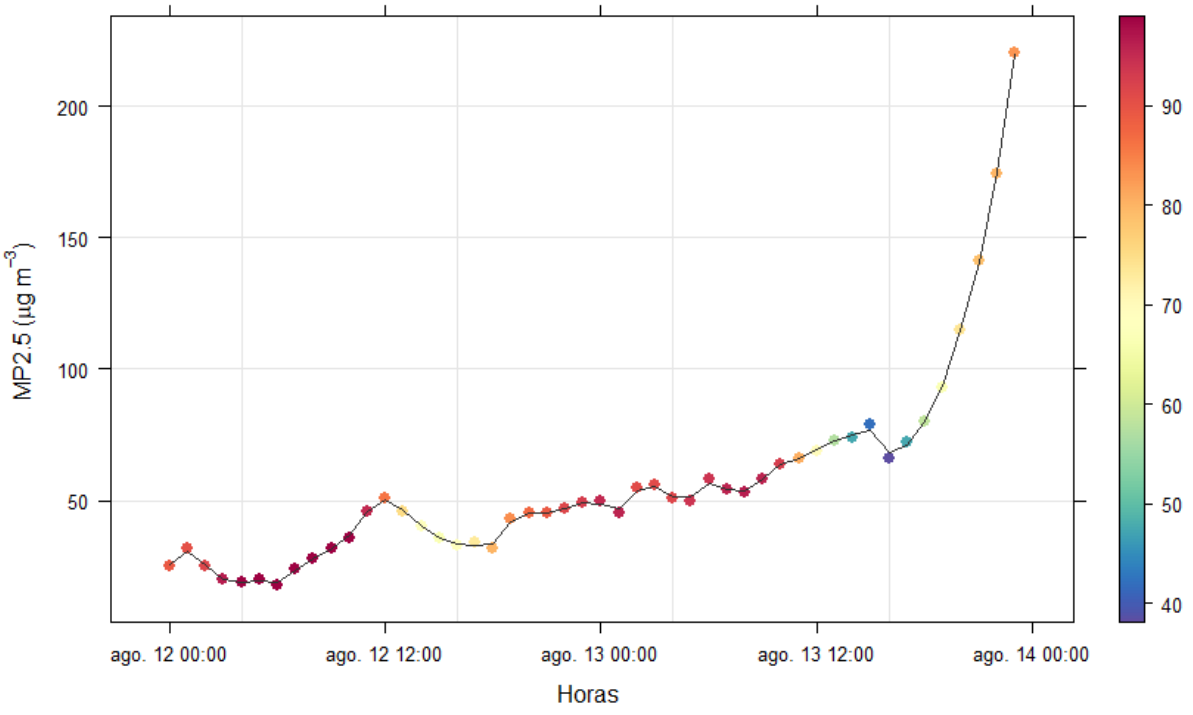

Figura 62: Porcentaje de humedad relativa en Cerro Navia entre los días 12-08-2021 y 13-08-2021.

Estas anomalías anteriormente descritas pueden ser causadas por el efecto de otras variables meteorológicas que no están siendo consideradas en conjunto a la humedad relativa. En la Figura 63 se puede apreciar el MP2.5 promedio móvil de 24 horas coloreado por el rango de temperatura en la estación Cerro Navia durante 2021, pudiéndose observar que un mayor rango de temperatura está asociado a mayores niveles de contaminante.

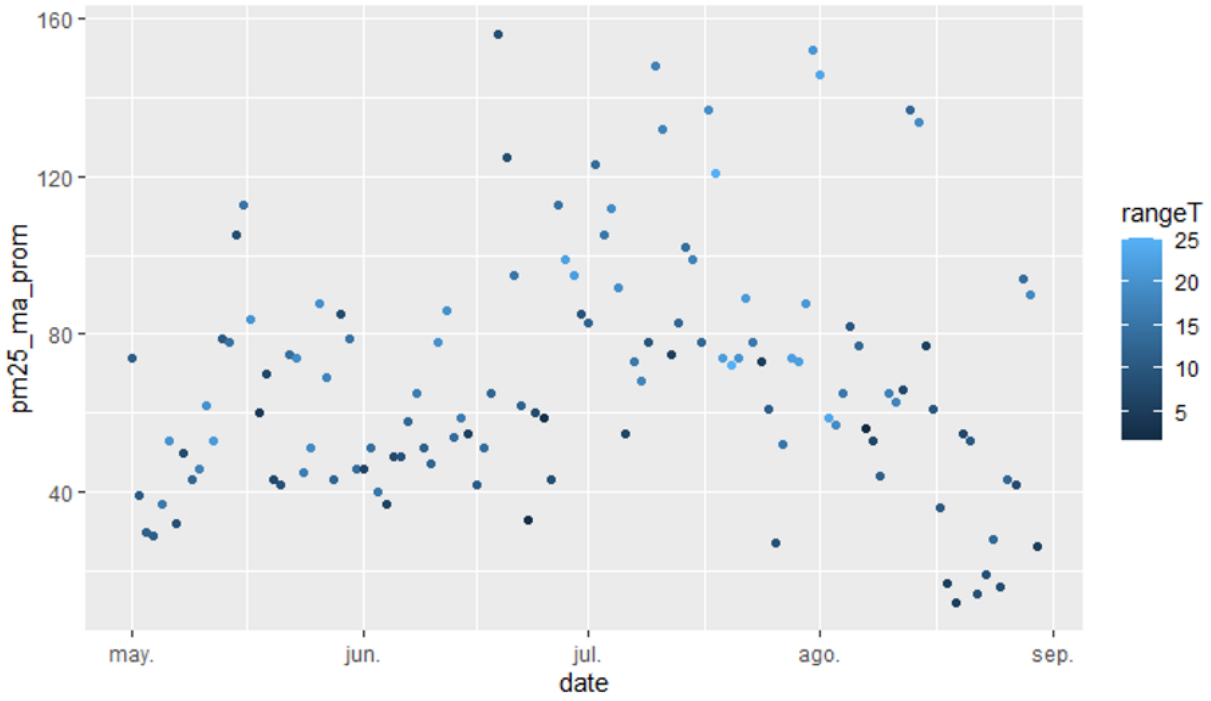

Figura 63: MP2.5 promedio móvil coloreado por niveles del rango de temperatura en estación Cerro Navia, año 2021.

La Tabla 23 muestra los rangos de temperatura y porcentaje humedad relativa en días previos a episodios críticos no declarados, los cuales reafirman la idea de que una gran variación o diferencia entre la temperatura máxima y mínima de un día, sumado a la presencia de un aire más seco, puede inducir a la posterior ocurrencia de un episodio crítico.

Tabla 23: Rango de Temperatura y Porcentaje de humedad relativa en días previos a episodios no declarados.

Rango de un día desde las 17:00 [h]	Humedad relativa mínima [%]	Rango de T [°C]
12-07-2021 y 13-07-2021	41	11
05-07-2021 y 06-08-2021	44	12
12-07-2021 y 13-08-2021	40	14

El evento crítico no declarado del día 24-07-2022, en las Figura 64 y Figura 65, describe un comportamiento similar a los primeros eventos analizados, donde una disminución de la humedad relativa desde las 12:00 h del día anterior, causa un *peak* de contaminación horas más tardes.

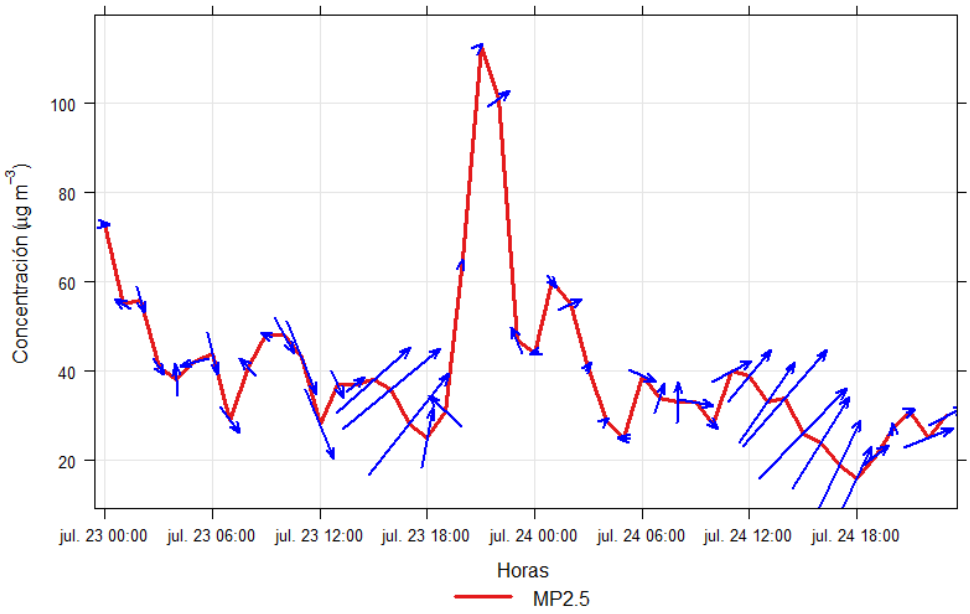

Figura 64: Dirección y velocidad del viento en Cerro Navia entre los días 23-07-2022 y 24-07-2022.

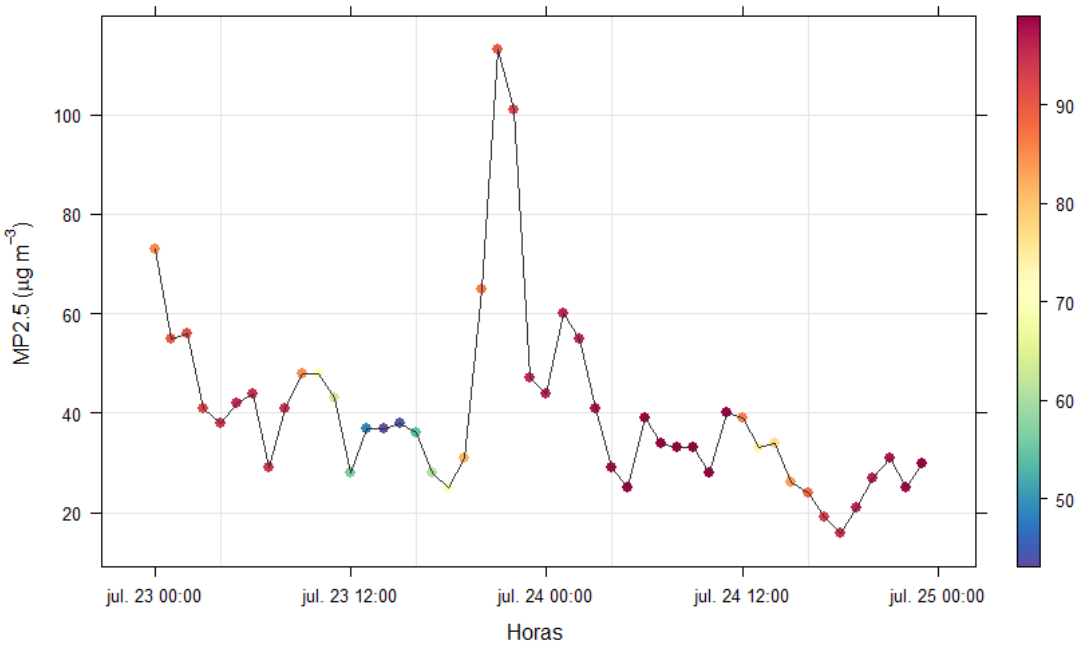

Figura 65: Porcentaje de humedad relativa en Cerro Navia entre los días 23-07-2022 y 24-07-2022.

4.7.- PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE CALIDAD DEL AIRE

La Figura 66 muestra la propuesta de metodología de calidad del aire conteniendo los aprendizajes de las actividades anteriores. Los recuadros rojos indican las sugerencias al flujo de análisis actual, considerando la información relevante que puede adicionarse para la determinación de eventos críticos.

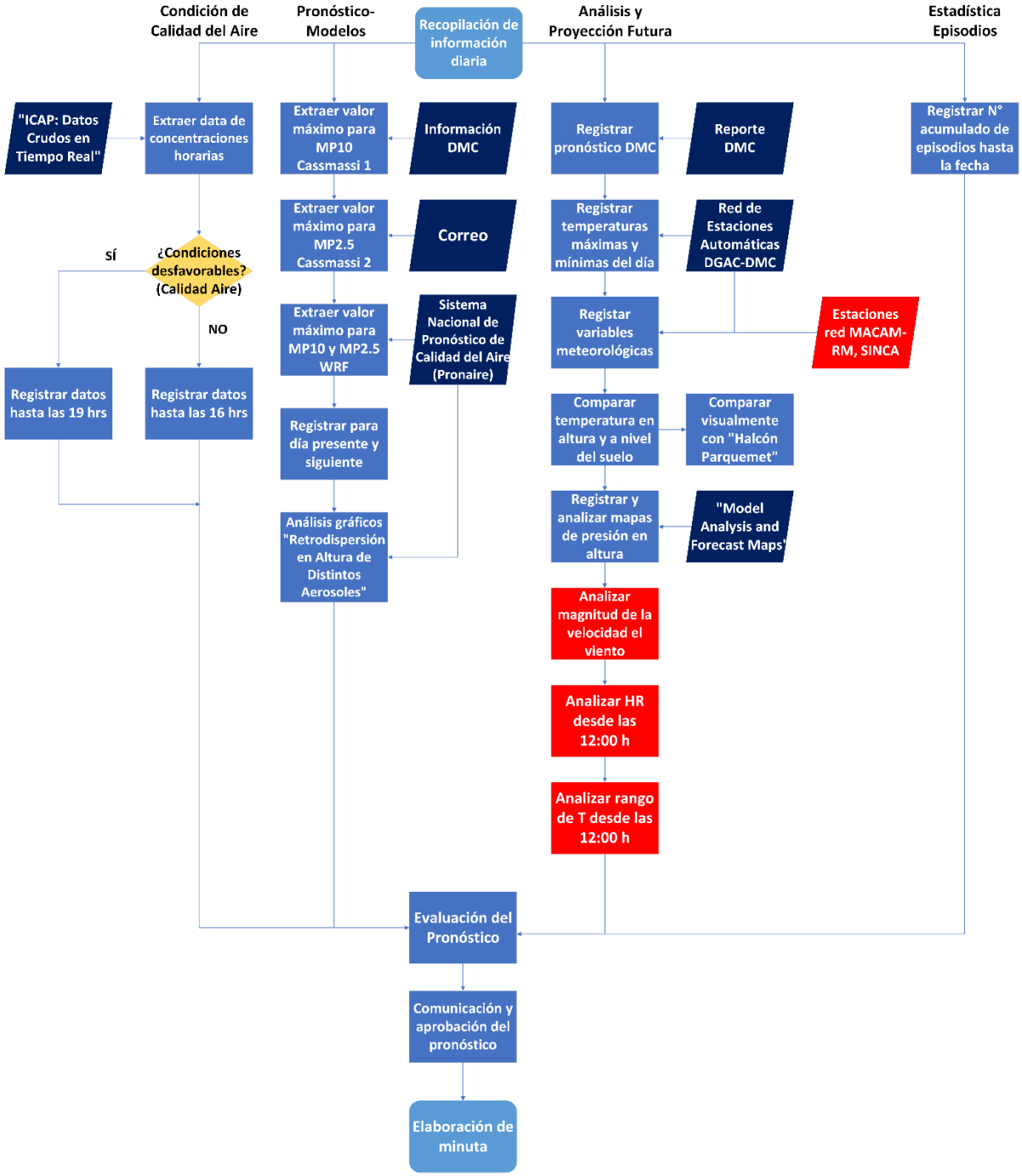

Figura 66: Propuesta de metodología de pronóstico de calidad del aire.

5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La geografía y el clima de la cuenca de Santiago en general son desfavorables para la dispersión de contaminantes atmosféricos, especialmente durante el semestre invernal. La persistencia de la baja costera sobre Chile Central, caracterizada por un calentamiento y secamiento muy marcado en torno al tope de la inversión térmica, y la mala ventilación asociada, producen condiciones críticas de contaminación atmosférica debido a la acumulación de contaminantes en la cuenca.

2. De acuerdo con la literatura, la velocidad media del viento y las temperaturas mínimas presentan una relación inversamente proporcional con la concentración de MP2.5 en la ciudad de Santiago. La humedad relativa presenta un efecto significativo con el material particulado debido a que las concentraciones de MP2.5 y MP10 aumentan cuando la humedad relativa es menor al 65%.

3. La SEREMI MA de la RM para realizar su pronóstico de calidad del aire recolecta información de concentraciones horarias de las distintas estaciones de la red MACAM, pronósticos de modelos computacionales y condiciones meteorológicas entregadas por la DMC, además de ponderar esta información de forma cualitativa a través de gráficos y mapas. Una vez reunida toda esta información, se emite un juicio y se realiza el pronóstico del día siguiente.

4. Entre las limitaciones de los procedimientos llevados a cabo por la SEREMI MA de la RM se encuentran los diversos factores que se deben analizar para el pronóstico, lo cual le añade incertidumbre al modelo (la dependencia compleja de los niveles de contaminación con las variables meteorológicas es un factor que dificulta la toma de decisiones). Además, estos análisis son realizados de forma cualitativa, por lo que se recomienda correr modelos ARIMA y Redes Neuronales Artificiales (ANN) con data histórica, para posteriormente evaluar su acierto en el pronóstico.

5. En adición, la estimación de posibles inversiones térmicas, la cual es una de las variables de mayor interés e impacto, se realiza mediante la comparación de la temperatura en estaciones que distan kilómetros entre sí, por lo que la principal recomendación es determinar inversiones térmicas de forma cuantitativa contando con un perfil de temperatura vertical completo (data en altura), siendo necesario además muestrear una gran masa de aire.

6. Analizando las variables meteorológicas y de calidad del aire de los periodos GEC de los años 2017 a 2022 mediante la construcción de modelos GAM, se pudo evidenciar que en todas las estaciones analizadas se obtuvo una relación inversa entre la velocidad media del viento y el nivel de MP2.5 y/o MP10, mientras que el rango de temperatura mostró una proporción directa, significativa y lineal. En un posterior análisis del efecto múltiple de variables meteorológicas, se pudo apreciar que a medida que aumenta el rango de temperatura, también lo hace la concentración de MP2.5, mientras que la humedad relativa desciende. De lo anterior, se pudo deducir que una mayor variación de temperatura a lo largo del día durante

la temporada fría (asociado a un fortalecimiento de la inversión térmica), sumado a la presencia de un aire más seco, podría ser desfavorable para la dispersión de contaminantes.

7. Con respecto a las actividades antropogénicas que aportan a la emisión de material particulado al ambiente y, en consecuencia, a la ocurrencia de episodios críticos, mediante la realización de análisis estacionales se pudo observar que una forma sencilla de verificar que el MP2.5 ambiental está controlado por la quema de leña, es observar los perfiles diurnos de MP2.5 y verificar si el valor máximo es tarde en la noche y, además, es más alto que el *peak* que se presenta durante horas de la mañana. Durante fines de semana también se pudo apreciar un incremento en las concentraciones de MP2.5, debido también posiblemente a la quema de leña para calefacción domiciliaria.

8. Analizando el comportamiento y la asertividad de los modelos de calidad del aire utilizados para hacer pronósticos, se observó que el modelo Cassmassi 1 predijo de mejor manera la ocurrencia de no episodios; sin embargo, tuvo un 0% de acierto en Preemergencias. Además, se pudo apreciar una tendencia del modelo a sobre estimar evidenciado en que más del 60% de los episodios predichos en cada año fueron falsas alarmas. Los episodios no alertados en cada año superaron el 50%, lo que pudo ser debido principalmente a que al modelo no se le pueden incorporar inventarios de emisiones y las concentraciones de MP10 no dependen solamente de las condiciones meteorológicas, sino que también de las emisiones, evidenciado en su menor cantidad de aciertos durante julio (mes más frío) y fines de semana. Con respecto al modelo WRF para MP2.5, se pudo observar que predijo de mejor manera la ocurrencia de no episodios con respecto a la ocurrencia de episodios; sin embargo, tuvo un acierto total mayor al 70% en la predicción de estos últimos. Los episodios no alertados entre los años analizados fueron menores al 27%, lo que pudo ser debido principalmente a que en este modelo se pueden utilizar datos de entrada como inventarios de emisiones de gases y aerosoles (naturales y antropogénicos).

9. Un análisis de contaminantes realizado en el día previo y en aquellos de Eventos Críticos No Declarados mostró que, para MP10, un indicador a incluir para mejorar los pronósticos de un futuro evento crítico es la disminución de velocidad del viento desde las 18:00 h. Respecto a MP2.5, se concluye que la presencia de vientos es relevante en cuanto a velocidad y no dirección, antes y durante el evento crítico, donde una disminución de la velocidad tiene como consecuencia inmediata el aumento de concentración de contaminante. También, la disminución del porcentaje de humedad relativa desde las 12:00 h, con valores cercanos al 40%, sumado a una alta variabilidad en el rango de temperatura, son un fuerte indicador de futuros eventos críticos.

10. En conclusión, es recomendable incluir en el modelo de pronóstico las variables de velocidad de viento, porcentaje de humedad relativa y rango de temperatura en los horarios mencionados, además de considerar que, por lo general, los *peaks* de contaminación ocurren en horario nocturno por el efecto de la quema de madera a nivel residencial.

6.- REFERENCIAS

Abarca, R., & Hidalgo, J. (2019). *Metodología práctica para determinar el PMCA en pronósticos operativos de calidad del aire para la Región Metropolitana*.

Alvarado, G. (2010). *Estudio Integrado De Factores Que Influyen Sobre La Contaminación Atmosférica Por Material Particulado Respirable De Pudahuel* [Universidad de Chile]. http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Alvarado, Gerardo.pdf

Barmpadimos, I., Hueglin, C., Keller, J., Henne, S., & Prévôt, A. S. H. (2011). Influence of meteorology on PM10 trends and variability in Switzerland from 1991 to 2008. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *11*(4), 1813–1835. https://doi.org/10.5194/acp-11-1813-2011

Garreaud, R., & Rutllant, J. (2006). Factores Meteorológicos de la Contaminación Atmosférica en Santiago. En R. Morales (Ed.), *Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica en Santiago* (pp. 36–53). Editorial Universitaria. https://medium.com/@arifwicaksanaa/pengertian-use-case-a7e576e1b6bf

Gramsch, E., Cáceres, D., Oyola, P., Reyes, F., Vásquez, Y., Rubio, M. A., & Sánchez, G. (2014). Influence of surface and subsidence thermal inversion on PM 2.5 and black carbon concentration. *Atmospheric Environment*, *98*(December 2006), 290–298. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.066

Jorquera, H. (2021). Urban Climate Air quality management in Chile : Effectiveness of PM2.5 regulations. *Urban Climate*, *35*(June 2020). https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100764

Koutrakis, P., Sax, S. N., Sarnat, J. A., Coull, B., Demokritou, P., Oyola, P., Garcia, J., & Gramsch, E. (2005). Analysis of PM10, PM2.5, and PM2.5–10Concentrations in Santiago, Chile, from 1989 to 2001. *Journal of the Air and Waste Management Association*, *55*(3), 342–351. https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464627

Lopez-Noreña, A. I., Fernandez, R., & Puliafito, S. (2019). *ESPECIACIÓN DE INVENTARIOS DE EMISIONES DE AEROSOLES Y COMPUESTOS ORGANICOS VOLATILES PARA EL MODELO WRF-CHEM , APLICADO A LOS ESQUEMAS RADM-2, CBM-Z Y MOZART-4*. *September*.

M. El Shazly, S., O. Kassem, K., A. Hassan, A., & E. A., H. (2012). Assessment of Mixing Height at Qena/Upper Egypt Based on Radiosonde Data. *Resources and Environment*, *2*(6), 275–280. https://doi.org/10.5923/j.re.20120206.05

Morales, R. (2006). *Contaminación atmosférica urbana: episodios críticos de contaminación en Santiago* (1ª ed.). Editorial Universitaria.

Romero, H., & Henrique, F. (2021). INFLUENCIA SOBRE LAS TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE. *Geographicalia*, *73*, 155–176.

Yáñez, M. A., Baettig, R., Cornejo, J., Zamudio, F., Guajardo, J., & Fica, R. (2017). Urban airborne matter in central and southern Chile: Effects of meteorological conditions on fine and coarse particulate matter. *Atmospheric Environment*, *161*, 221–234. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.007

APÉNDICE

El material de difusión se encuentra disponible en el siguiente vínculo:

GEC