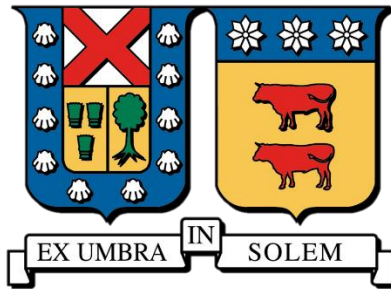


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
SANTIAGO-CHILE



**“MONITOREO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS A
TRAVÉS DE SENSORES EN DIVERSOS PUNTOS DE
LA REGIÓN METROPOLITANA”**

Catalina Victoria Donoso Donoso

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
MECÁNICA**

Profesora guía: Dr. Mauricio Osses Alvarado

Co-referente: Dr. Sebastián Diez

Enero 2025

Agradecimientos

Con gran gratitud y aprecio dedico estas líneas a mis seres queridos, gracias a ustedes pude finalizar mis años de carrera. Su apoyo incondicional me permitió seguir adelante, incluso cuando dudaba de mis capacidades. Agradezco profundamente a mis padres por brindarme la mejor educación posible, y, sobre todo, por cuidarme a lo largo de este proceso. A mis hermanas, Fernanda y Javiera, por acompañarme, regalarme tardes de diversión, y darme siempre su apoyo y cariño. A mi compañero de vida, Bastián, por motivarme cada día, enseñarme todo aquello en lo que sentía que fallaba y, sobre todo, por creer en mí y darme las fuerzas que no sabía que tenía. También quiero expresar mi gratitud a mis compañeros mecánicos que me ayudaron a sobrellevar de mejor manera los ramos, en especial, a Matías, por quedarse a altas horas de la noche conmigo terminando los trabajos y por su valiosa amistad. Por supuesto, no puede faltar una mención a mi ser celestial y luz de mi vida, mi perrita Suki, cuya única misión en la vida ha sido ser amada.

Gracias a mi profesor guía, Mauricio Osses, por orientarme y confiarme esta memoria, por estar siempre dispuesto a ayudarme y por ser una persona atenta y comprometida con sus alumnos. También al equipo de telemática, por tomarse el tiempo de enseñarme y permitirme participar en lo necesario.

Espero que en un futuro pueda encontrar más mujeres interesadas en la ingeniería y que demuestren sus capacidades sin miedo ni inseguridades.

Por último, se agradece el apoyo recibido por el Proyecto FONDECYT REGULAR 1241477, etapa 2024.

Resumen

Se propone un plan de monitoreo para la Región Metropolitana mediante el uso de sensores de calidad de aire que realizan la medición de la concentración de masa de materiales particulados y concentración de gases. Específicamente, se mide el material particulado 2.5 (MP2.5) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) ya que son los contaminantes más nocivos para la salud humana. Se realiza un análisis exhaustivo del comportamiento de dichos contaminantes en tres zonas distintas: vivienda urbana, industrial y con baja densidad vehicular, con el fin de estudiar las curvas que se generan durante el día, teniendo como variable el flujo vehicular presente.

Inicialmente para el desarrollo del plan de monitoreo es necesario la selección de un sensor de calidad de aire que cumpla con los requisitos preliminares. Para ello se realiza un estudio de los sensores presentes en el mercado que tengan como contaminantes objetivos el MP2.5 y el NO₂, independiente si pueden medir otros contaminantes. Durante la búsqueda se selecciona 9 dispositivos como posible opción, siendo estos: Clarity, Airly, QuantAQ, Bettair, KunakAir, AQMesh, Ellona (WT1), Prana Air y ekoNet. Adicionalmente, se propone una solución alternativa: el prototipo USM, el cual es un conjunto de sensores de MP2.5 y NO₂, y un contador de vehículos, presentando una estructura de costo menor que los dispositivos anteriores.

Para reducir las opciones, se optan por criterios de selección que aseguran un buen funcionamiento operativo del sensor, haciendo mayor hincapié en la calibración de los dispositivos y en el costo de su obtención. Dando como mejor opción el dispositivo Clarity, ya que presenta certificados y gráficos corroborando su calibración de 0,97 para el MP2.5 y 0,83 para NO₂ y ser además el que presenta un menor costo en comparación a los otros posibles dispositivos.

Después de la selección del dispositivo, se procede a analizar los datos medidos por el sensor Clarity para realizar la propuesta del plan de monitoreo. El análisis consiste en graficar los datos semanalmente de las tres zonas mencionadas anteriormente, para el caso del MP2.5, se grafican los datos horarios, obteniendo su promedio diario e indicando los límites que establecen la OMS (Organización Mundial de la Salud) y la normativa chilena. Además, se realizan tablas donde se muestran en que rangos de tiempo los valores fueron mayor al promedio diario y por último se realizan gráficos del promedio acumulado horario hasta llegar a su promedio diario. Por otra parte, se grafican los datos de 1 hora y de 15 minutos del dióxido de nitrógeno, acompañado de su variación de datos y de las normas de la OMS y chilena. A parte, se realizan los gráficos de promedio acumulado por hora hasta llegar al promedio diario.

En la zona de vivienda urbana, los promedios diarios del MP2.5 se mantienen por debajo de 25 [µg/m³], mientras que los niveles de NO₂ son inferiores a 30 [ppb]. En la zona industrial, el promedio diario de 24 horas de MP2.5 está por debajo de 30 [µg/m³] y el de NO₂ no supera los 31 [ppb].

Finalmente, en la zona de baja densidad vehicular, los dispositivos SINCA, Clarity y USM registran promedios diarios de MP2.5 inferiores a 27 [µg/m³], 66 [µg/m³] y 38 [µg/m³], respectivamente. Para el NO₂, los promedios diarios son menores a 32 [ppb], 26 [ppb] y 8 [ppb], según los datos proporcionados por cada dispositivo.

Con respecto a los promedios acumulados horario del MP2.5 y del NO₂, ambos demuestran un comportamiento de la curva similar, llegando a asimilarse a un comportamiento polinomial de grado 2, lo cual permite predecir un valor máximo del promedio diario que se puede presentar.

El plan de monitoreo propuesto consiste en entregar los valores de los sensores a tres usuarios específicos: básico, intermedio y avanzado. El básico es aquel dirigido a todo público, al cual se les da acceso a los datos de promedio acumulado horario del MP2.5 y de promedio acumulado cada 15 minutos del NO₂, los cuales son capaces entregar una aproximación del promedio diario y horario real, respectivamente. Se define además una escala de colores con los niveles de emergencia: bueno, regular, alerta, preemergencia y emergencia para dar a conocer la calidad del aire. El usuario intermedio integra las herramientas del básico, pero se le añade los estados de los sensores y la opción de obtener gráficamente los datos diarios, semanal y mensual de los dispositivos. Por último, el avanzado es capaz de acceder a todo lo anterior, adicionalmente puede descargar los datos en tiempo real del dispositivo.

La validación del sensor de calidad seleccionado se realiza comparando los valores reportados por el SINCA (Sistema de Información Nacional de Calidad de Aire) con los obtenidos de los sensores Clarity y USM. El sensor Clarity demuestra un patrón de comportamiento similar al SINCA, sin embargo, esta entrega valores 3 veces mayores al de referencia, indicando un error en su calibración, justificada por la humedad relativa presente. Mientras que el dispositivo USM logra presentar un coeficiente de determinación de 0,83 para el MP2.5 y de 0,57 para el NO₂, siendo el sensor del NO₂ un valor muy lejano a 1 y, por ende, presenta más anomalías en su calibración. Este utiliza la misma justificación que se dio para el Clarity.

Mientras que la validación del plan de monitoreo se realiza dentro de un periodo de prueba de 1 semana con el sensor ubicado en la zona industrial por su aleatoriedad de datos. La recta polinomial propuesta logra predecir la curva con un error entre el 20% a 36%. Por otra parte, el promedio acumulado por cada 15 minutos del NO₂, logra ser capaz de presentar valores cercanos al promedio horario, presentando un error menor al 10% en la mayoría de sus casos.

Abstract

A monitoring plan is proposed for the Metropolitan Region using air quality sensors that measure the mass concentration of particulate matter and gas concentrations. Specifically, particulate matter 2.5 (PM_{2.5}) and nitrogen dioxide (NO₂) are measured, as they are the most harmful pollutants to human health. An exhaustive analysis of the behavior of these pollutants is conducted in three distinct zones: urban housing, industrial, and low-traffic density, to study the curves generated throughout the day, with vehicle flow as a variable.

Initially, to develop the monitoring plan, it is necessary to select an air quality sensor that meets preliminary requirements. For this purpose, a study is conducted on available market sensors that target PM_{2.5} and NO₂, regardless of their ability to measure other pollutants. During the search, nine devices are selected as possible options: Clarity, Airly, QuantAQ, Bettair, KunakAir, AQMesh, Ellona (WT1), Prana Air, and ekoNet. Additionally, an alternative solution is proposed: the USM prototype, which is a combination of PM_{2.5} and NO₂ sensors, along with a vehicle counter, offering a lower-cost structure compared to the other devices.

To narrow down the options, selection criteria are used to ensure proper operational performance of the sensors, with greater emphasis on device calibration and acquisition costs. The Clarity device is identified as the best option, as it provides certificates and calibration charts showing coefficients of 0.97 for PM_{2.5} and 0.83 for NO₂, in addition to having a lower cost compared to other options.

After selecting the device, data measured by the Clarity sensor is analyzed to propose the monitoring plan. The analysis involves weekly graphing of data from the three aforementioned zones. For PM_{2.5}, hourly data is graphed, with daily averages calculated and the limits established by the WHO (World Health Organization) and Chilean regulations indicated. Tables are created to show time ranges where values exceeded the daily average, and cumulative hourly averages are graphed until reaching the daily average. For NO₂, data is graphed in 1-hour and 15-minute intervals, accompanied by data variation and compliance with WHO and Chilean standards. Additionally, cumulative hourly averages are graphed until reaching the daily average.

In the urban housing zone, daily averages of PM_{2.5} remain below 25 [µg/m³], while NO₂ levels are under 30 [ppb]. In the industrial zone, the 24-hour daily average of PM_{2.5} stays below 30 [µg/m³], and NO₂ does not exceed 31 [ppb].

Finally, in the low-traffic density zone, the SINCA, Clarity, and USM devices record daily averages of PM_{2.5} below 27 [µg/m³], 66 [µg/m³], and 38 [µg/m³], respectively. For NO₂, daily averages are under 32 [ppb], 26 [ppb], and 8 [ppb], according to data provided by each device.

Regarding the cumulative hourly averages of PM_{2.5} and NO₂, both exhibit similar curve behavior, approximating a second-degree polynomial pattern, which allows the prediction of a maximum daily average value.

The proposed monitoring plan delivers sensor values to three specific user types: basic, intermediate, and advanced. The basic user, aimed at the general public, is provided with access to cumulative hourly averages of PM_{2.5} and 15-minute averages of NO₂, capable of approximating real daily and hourly averages, respectively. A color-coded scale with emergency levels (good, moderate, alert, pre-emergency, and emergency) is also defined to convey air quality levels. The intermediate user includes the basic tools but adds sensor status information and the ability to obtain daily, weekly, and

monthly graphical data from the devices. Lastly, the advanced user can access all of the above and download real-time data from the device.

The selected air quality sensor is validated by comparing values reported by SINCA (National Air Quality Information System) with those obtained from the Clarity and USM sensors. The Clarity sensor demonstrates a behavior pattern similar to SINCA, but its readings are three times higher than the reference, indicating a calibration error justified by the relative humidity. Meanwhile, the USM device shows a determination coefficient of 0.83 for PM_{2.5} and 0.57 for NO₂, with the latter being far from 1, indicating more calibration anomalies. This issue is similarly attributed to relative humidity as in the Clarity case.

The monitoring plan validation is conducted during a 1-week trial period with the sensor located in the industrial zone due to data variability. The proposed polynomial curve predicts trends with an error range of 20% to 36%. Additionally, the cumulative 15-minute average of NO₂ closely approximates hourly averages, with errors below 10% in most cases.

Glosario

MP2.5	Material Particulado con un diámetro menor a 2.5 micrómetros.
NO ₂	Dióxido de nitrógeno, un gas contaminante del aire.
SINCA	Sistema de información nacional de calidad del aire.
OMS	Organización Mundial de la Salud.
SBC	Single Board Computer.
API	Interfaz de programación de aplicaciones.
AQI	Índice de Calidad del Aire.
Protoboard	Tablero de pruebas para circuitos electrónicos.
IoT	Internet de las Cosas (Internet of Things), red de dispositivos conectados.
YOLO	Algoritmo de detección de objetos en tiempo real (You Only Look Once).

Índice

Agradecimientos	2
Resumen.....	3
Abstract	5
Glosario	7
Índice de gráficos	11
Índice de tablas.....	13
Índice de ilustraciones.....	15
Introducción	17
Objetivos	18
1. Capítulo 1. Estado del Arte	19
1.1. Contaminantes emitidos por el transporte.....	19
1.2. ¿Cómo el transporte libera estas concentraciones a la atmósfera?	19
1.3. ¿Qué efectos nocivos trae a la salud de los ciclistas la contaminación del aire?	21
1.4. Red SINCA	22
1.5. Normas de calidad de aire.....	24
1.5.1. Organización Mundial de la Salud	24
1.5.2. Norma Chilena	24
1.6. Sensores de calidad de aire	25
1.6.1. Funcionamiento de los sensores.....	26
1.6.2. Aspectos por considerar de los sensores	27
1.7. Sensores de bajo costo operados por distintas entidades	28
2. Capítulo 2. Selección de sensor de calidad de aire.....	32
2.1. Metodología para la selección de sensor	32
2.2. Criterios de selección.....	32
2.3. Análisis de sensores	33
2.3.1. Clarity.....	33
2.3.1.1.Diagrama del sensor Clarity Node-S.....	34
2.3.2. Airly	35
2.3.3. QuantAQ	35
2.3.4. Bettair.....	35
2.3.5. KunakAir.....	36
2.3.6. AQMesh	36
2.3.7. Ellona WT1 Lite.....	37
2.3.8. Prana Air	37

2.3.9.	EkoNET	38
2.3.10.	Dispositivo USM.....	38
2.4.	Estructura de costos	39
2.5.	Selección de dispositivo y conclusiones	41
3.	Capítulo 3. Plan de monitoreo	43
3.1.	Metodología para el desarrollo del plan de monitoreo	43
3.2.	Escenarios a estudiar.....	43
3.2.1.	Zona de vivienda urbana	43
3.2.2.	Zona industrial	44
3.2.3.	Zona de baja densidad vehicular	45
3.3.	Análisis de datos	46
3.3.1.	Zona de vivienda urbana	46
3.3.2.	Conclusión de los contaminantes de la vivienda urbana.....	53
3.3.3.	Zona industrial	54
3.3.4.	Conclusión de la zona industrial	61
3.3.5.	Zona de baja densidad vehicular	61
3.3.6.	Conclusión de la zona con baja densidad vehicular	71
3.4.	Conclusión del análisis de distintas zonas	72
3.5.	Organización de datos.....	72
3.5.1.	Tipo de usuarios	73
3.5.2.	Indicadores cualitativos y cuantitativos.....	74
3.5.3.	Prototipo del Dashboard	75
3.6.	Conclusiones de la organización de datos.....	78
4.	Capítulo 4. Validación de dispositivo y plan de monitoreo.....	79
4.1.	Metodología para la validación.....	79
4.2.	Validación de los dispositivos.....	79
4.2.1.	Resultados calibración dispositivo USM.....	79
4.2.2.	Validación del sensor seleccionado	82
4.2.3.	Conclusión de dispositivos.....	82
4.3.	Validación del plan de monitoreo	83
4.3.1.	Zona de prueba.....	83
4.3.2.	Recolección de datos.....	83
4.3.3.	Análisis de los promedios acumulados del MP2.5.....	85
4.3.4.	Análisis de los promedios acumulados del NO ₂	87
4.3.5.	Evaluación de las predicciones de curva.....	89

4.3.6.	Conclusión del plan de monitoreo.....	90
5.	Capítulo 5. Conclusiones.....	91
5.1.	Conclusiones generales.....	91
5.2.	Conclusiones específicas	92
5.3.	Recomendaciones	95
	Bibliografía	97
	Anexo	99
	Anexo A: Gráficos de MP2.5 y NO ₂	99
	Anexo A.1: Zona de vivienda urbana.....	99
	Anexo A.2: Zona industrial	112
	Anexo A.3: Zona de baja densidad vehicular.....	117
	Anexo B	136

Índice de gráficos

Gráfico 1: Emisiones totales por contaminante 2022 [ton/año] en la región Metropolitana. Fuente: Dictuc ¹	20
Gráfico 2: Emisiones totales por contaminante 2022 [ton/año], excluyendo CO2 en la región Metropolitana. Fuente: Dictuc ¹	21
Gráfico 3: Datos por hora del MP2,5 obtenidos en la Semana 2 con su promedio diario y los límites de promedio diario de la OMS y de las normativas chilenas.	46
Gráfico 4: Datos por hora del NO ₂ obtenidos en la Semana 2 con su promedio diario y los límites de promedio horario y diario de la OMS y de las normativas chilenas.	50
Gráfico 5: Mediciones del NO ₂ cada 15 minutos de la Semana 2.....	51
Gráfico 6: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO ₂ en la Semana 2.....	52
Gráfico 7: Datos por hora del MP2,5 obtenidos en la Semana 1 con su promedio diario y los límites de promedio diario de la OMS y de las normativas chilenas.	54
Gráfico 8: Datos por hora del NO ₂ obtenidos en la Semana 1 con su promedio diario y los límites de promedio horario y diario de la OMS y de las normativas chilenas.	57
Gráfico 9: Mediciones del NO ₂ cada 15 minutos de la Semana 1.....	59
Gráfico 10: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO ₂ en la Semana 1.....	59
Gráfico 11: Datos horarios del MP2.5 extraídos de los dispositivos SINCA, Clarity y USM de la Semana 4.	62
Gráfico 12: Promedios diarios del MP2.5 de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 4, en conjunto con las normas diarias de la OMS y chilena.	63
Gráfico 13: Datos horarios del NO ₂ extraídos de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 4, en conjunto a la norma horaria chilena.	66
Gráfico 14: Promedios diarios del NO ₂ de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 4, en conjunto con las normas diarias de la OMS y chilena.	67
Gráfico 15: Mediciones cada 15 minutos del NO ₂ del dispositivo Clarity de la Semana 4.....	68
Gráfico 16: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO ₂ del dispositivo Clarity de la Semana 4.	68
Gráfico 17: Mediciones cada 1 minuto del NO ₂ del dispositivo USM de la Semana 4.....	69
Gráfico 18: Variaciones de la medición de 1 minuto del NO ₂ del dispositivo USM de la Semana 4.	69
Gráfico 19: Datos correspondientes al MP2.5 desde el mes de abril hasta el mes de agosto.	82
Gráfico 20: Datos por hora del MP2,5 obtenidos con su promedio diario y los límites de promedio diario de la OMS y de las normativas chilenas.	84
Gráfico 21: Datos por hora del NO ₂ obtenidos con su promedio diario y límites del promedio diario y horario de la OMS y normativas chilenas.	85
Gráfico 22: Datos del MP2,5 obtenidos en la Semana 1 con su promedio diario y los límites de promedio diario de la OMS y de las normativas chilenas.	99
Gráfico 23: Datos por hora del NO ₂ obtenidos en la Semana 1 con su promedio diario y los límites de promedio horario y diario de la OMS y de las normativas chilenas.	101
Gráfico 24: Mediciones del NO ₂ cada 15 minutos de la Semana 1.....	102
Gráfico 25: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO ₂ en la Semana 1.	103
Gráfico 26: Datos del MP2,5 obtenidos en la Semana 3 con su promedio diario y los límites de promedio diario de la OMS y de las normativas chilenas.	103
Gráfico 27: Datos por hora del NO ₂ obtenidos en la Semana 3 con su promedio diario y los límites de promedio horario y diario de la OMS y de las normativas chilenas.	105

Gráfico 28: Mediciones del NO ₂ cada 15 minutos de la Semana 3.....	107
Gráfico 29: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO ₂ en la Semana 3.....	108
Gráfico 30: Datos del MP2,5 obtenidos en la Semana 4 con su promedio diario y los límites de promedio diario de la OMS y de las normativas chilenas.....	108
Gráfico 31: Datos por hora del NO ₂ obtenidos en la Semana 4 con su promedio diario y los límites de promedio horario y diario de la OMS y de las normativas chilenas.....	110
Gráfico 32: Mediciones del NO ₂ cada 15 minutos de la Semana 4.....	111
Gráfico 33: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO ₂ en la Semana 4.....	112
Gráfico 34: Datos del MP2,5 obtenidos en la Semana 2 con su promedio diario y los límites de promedio diario de la OMS y de las normativas chilenas.....	112
Gráfico 35: Datos por hora del NO ₂ obtenidos en la Semana 2 con su promedio diario y los límites de promedio horario y diario de la OMS y de las normativas chilenas.....	114
Gráfico 36: Mediciones del NO ₂ cada 15 minutos de la Semana 2.....	116
Gráfico 37: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO ₂ en la Semana 2.....	117
Gráfico 38: Datos horarios del MP2.5 extraídos de los dispositivos SINCA, Clarity y USM de la Semana 1.....	117
Gráfico 39: Promedios diarios del MP2.5 de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 1, en conjunto con las normas diarias de la OMS y chilena.....	118
Gráfico 40: Datos horarios del NO ₂ extraídos de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 1, en conjunto a la norma horaria chilena.....	119
Gráfico 41: Promedios diarios del NO ₂ de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 1, en conjunto con las normas diarias de la OMS y chilena.....	120
Gráfico 42: Mediciones cada 15 minutos del NO ₂ del dispositivo Clarity de la Semana 1.....	121
Gráfico 43: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO ₂ del dispositivo Clarity de la Semana 1.....	122
Gráfico 44: Mediciones cada 1 minuto del NO ₂ del dispositivo USM de la Semana 1.....	122
Gráfico 45: Variaciones de las mediciones de 1 minuto del NO ₂ del dispositivo USM de la Semana 1.....	123
Gráfico 46: Datos horarios del MP2.5 extraídos de los dispositivos SINCA, Clarity y USM de la Semana 2.....	123
Gráfico 47: Promedios diarios del MP2.5 de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 2, en conjunto con las normas diarias de la OMS y chilena.....	124
Gráfico 48: Datos horarios del NO ₂ extraídos de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 2, en conjunto a la norma horaria chilena.....	125
Gráfico 49: Promedios diarios del NO ₂ de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 2, en conjunto con las normas diarias de la OMS y chilena.....	126
Gráfico 50: Mediciones cada 15 minutos del NO ₂ del dispositivo Clarity de la Semana 2.....	128
Gráfico 51: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO ₂ del dispositivo Clarity de la Semana 2.....	128
Gráfico 52: Mediciones cada 1 minuto del NO ₂ del dispositivo USM de la Semana 2.....	129
Gráfico 53: Variaciones de las mediciones de 1 minuto del NO ₂ del dispositivo USM de la Semana 1.....	129
Gráfico 54: Datos horarios del MP2.5 extraídos de los dispositivos SINCA, Clarity y USM de la Semana 3.....	130
Gráfico 55: Promedios diarios del MP2.5 de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 3, en conjunto con las normas diarias de la OMS y chilena.....	130

Gráfico 56: Datos horarios del NO ₂ extraídos de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 3, en conjunto a la norma horaria chilena.	132
Gráfico 57: Promedios diarios del NO ₂ de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 3, en conjunto con las normas diarias de la OMS y chilena.	132
Gráfico 58: Mediciones cada 15 minutos del NO ₂ del dispositivo Clarity de la Semana 3.	134
Gráfico 59: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO ₂ del dispositivo Clarity de la Semana 3.	134
Gráfico 60: Mediciones cada 1 minuto del NO ₂ del dispositivo USM de la Semana 3.	135
Gráfico 61: Variaciones de las mediciones de 1 minuto del NO ₂ del dispositivo USM de la Semana 3.	135

Índice de tablas

Tabla 1: Parámetros de promedio de la calidad de aire según la OMS.	24
Tabla 2: Parámetros de promedio de la calidad de aire según la Norma Chilena.	24
Tabla 3: Niveles de concentración del material particulado 2.5.	24
Tabla 4: Niveles de concentración del dióxido de nitrógeno.	25
Tabla 5: Tipos de sensores de calidad de aire con su contaminante objetivo y características asociadas. Tabla extraída de GAO ⁸	25
Tabla 6: Sensores de calidad de aire cuasi permanentes operadas por empresas privadas con sus respectivas características.	29
Tabla 7: Sensores de calidad de aire cuasi permanentes operadas por el gobierno con sus respectivas características.	29
Tabla 8: Sensores de calidad de aire cuasi permanentes operadas por instituciones de investigación o universidades con sus respectivas características.	30
Tabla 9: Sensores de calidad de aire cuasi permanentes (campañas) operadas por empresas privadas con sus respectivas características.	30
Tabla 10: Costos de adquisición más valores de operación del primer año para los proveedores estudiados.	40
Tabla 11: Costos asociados al montaje de los sensores por componentes individuales.	40
Tabla 12: Costo de adquisición para completar niveles 1, 2 y 3 (CLP sin IVA).	41
Tabla 13: Costos del módulo USM dentro de un horizonte de evaluación de 5 años.	41
Tabla 14: Tabla comparativa de los sensores con los criterios definidos.	41
Tabla 15: Datos específicos extraídos del gráfico generado del material particulado 2.5 de la Semana 2.	47
Tabla 16: Gráficos del promedio acumulado horario del MP2.5 de la Semana 2.	48
Tabla 17: Datos específicos extraídos del gráfico generado del dióxido de nitrógeno de la Semana 2.	50
Tabla 18: Gráficos del promedio acumulado horario del NO ₂ de la Semana 2.	52
Tabla 19: Datos específicos extraídos del gráfico generado del material particulado 2.5 de la Semana 1.	55
Tabla 20: Gráficos del promedio acumulado horario del MP2.5 de la Semana 1.	56
Tabla 21: Datos específicos extraídos del gráfico generado del dióxido de nitrógeno de la Semana 1.	58
Tabla 22: Gráficos del promedio acumulado horario del NO ₂ de la Semana 1.	60

Tabla 23: Promedio acumulado horario del MP2.5 de cada día de los dispositivos SINCA, Clarity y USM, correspondiente a la Semana 4.	64
Tabla 24: Promedios acumulados horarios del NO ₂ de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 4.	70
Tabla 25: Rangos del nivel de emergencia en conjunto de la escala de colores del MP2.5 en un periodo de 24 horas.	74
Tabla 26: Rangos del nivel de emergencia en conjunto de la escala de colores del MP2.5 en un periodo de 1 hora.	74
Tabla 27: Recomendaciones del MINSAL para los niveles de emergencias correspondientes.	75
Tabla 28: Coeficientes de determinación (R ²) y Errores Cuadráticos Medios (MSE) obtenidos con la calibración para las etapas de entrenamiento, validación y testing de PM 2.5, NO y NO ₂	79
Tabla 29: Promedio acumulado del MP2.5 horario teórico vs el real.	86
Tabla 30: Promedio acumulado del MP2.5 teórico nuevo vs el real.	87
Tabla 31: Promedio acumulado de 15 minutos del NO ₂ vs el promedio horario.	88
Tabla 32: Porcentaje de error entre el promedio acumulado real y el teórico del MP2.5	89
Tabla 33: Error del promedio acumulado de 15 minutos con el promedio horario del NO ₂ del jueves.	90
Tabla 34: Datos específicos extraídos del gráfico generado del material particulado 2.5 de la Semana 1.	99
Tabla 35: Gráficos del promedio acumulado horario del MP2.5 de la Semana 1.	99
Tabla 36: Datos específicos extraídos del gráfico generado del dióxido de nitrógeno de la Semana 1.	101
Tabla 37: Gráficos del promedio acumulado horario del NO ₂ de la Semana 1.	101
Tabla 38: Datos específicos extraídos del gráfico generado del material particulado 2.5 de la Semana 3.	103
Tabla 39: Gráficos del promedio acumulado horario del MP2.5 de la Semana 3.	104
Tabla 40: Datos específicos extraídos del gráfico generado del dióxido de nitrógeno de la Semana 3.	106
Tabla 41: Gráficos del promedio acumulado horario del NO ₂ de la Semana 3.	106
Tabla 42: Datos específicos extraídos del gráfico generado del material particulado 2.5 de la Semana 4.	109
Tabla 43: Gráficos del promedio acumulado horario del MP2.5 de la Semana 4.	109
Tabla 44: Datos específicos extraídos del gráfico generado del dióxido de nitrógeno de la Semana 4.	110
Tabla 45: Gráficos del promedio acumulado horario del NO ₂ de la Semana 4.	110
Tabla 46: Datos específicos extraídos del gráfico generado del material particulado 2.5 de la Semana 2.	113
Tabla 47: Gráficos del promedio acumulado horario del MP2.5 de la Semana 2.	113
Tabla 48: Datos específicos extraídos del gráfico generado del NO ₂ de la Semana 2.	115
Tabla 49: Promedio acumulado horario del NO ₂ de la Semana 2.	115
Tabla 50: Promedio acumulado horario del MP2.5 de cada día de los dispositivos SINCA, Clarity y USM, correspondiente a la Semana 1.	118
Tabla 51: Promedios acumulados horarios del NO ₂ de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 1.	120
Tabla 52: Promedio acumulado horario del MP2.5 de cada día de los dispositivos SINCA, Clarity y USM, correspondiente a la Semana 2.	124

Tabla 53: Promedios acumulados horarios del NO ₂ de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 2.	126
Tabla 54: Promedio acumulado horario del MP2.5 de cada día de los dispositivos SINCA, Clarity y USM, correspondiente a la Semana 3.	131
Tabla 55: Promedios acumulados horarios del NO ₂ de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 3.	133
Tabla 56: Error del promedio acumulado de 15 minutos con el promedio horario del NO ₂	136

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Mapa en vivo de la calidad del aire en la Región Metropolitana entregado por SINCA a las 00:44 a.m un 12 de julio del 2024.	23
Ilustración 2: Gráfico de MP2,5 otorgado por la Red de Monitoreo en línea de la comuna Puente Alto a las 19:00 p.m un 17 de agosto del 2024.	23
Ilustración 3: Diagrama del sensor de calidad Clarity Node-S	34
Ilustración 4: Diagrama del módulo de calidad de aire USM.	39
Ilustración 5: Viste satelital Valle Lo Campino.	44
Ilustración 6: Colocación de los dispositivos en la Universidad Técnica Federico Santa María.	45
Ilustración 7: Ubicación de la Universidad Técnica Federico Santa María en el Campus San Joaquín.	45
Ilustración 8: Colocación de dispositivos en Estación de Monitoreo del SINCA en Parque O'Higgins.	46
Ilustración 9: Ubicación de la Estación de Monitoreo del SINCA en Parque O'Higgins.	46
Ilustración 10: Escala de colores para nivel de emergencia.	74
Ilustración 11: Indicador de calidad de aire del MP2.5 en [ug/m ³]	75
Ilustración 12: Indicador de calidad del aire del NO ₂ en [ppb].	75
Ilustración 13: Prototipo de Dashboard del usuario básico.	76
Ilustración 14: Prototipo de Dashboard del usuario intermedio.	77
Ilustración 15: Prototipo de Dashboard del usuario avanzado.	77
Ilustración 16: Calibración de Sensores MP2.5: Curva de aproximaciones obtenidas sobre el sensor PLANTOWER PMS7003. La recta roja es la curva de ajuste entregada por la regresión lineal, y los puntos azules representan los cruces entre el dato del sensor bajo costo y el valor en ese momento reportado por SINCA. Los resultados se dividen en tres conjuntos de datos: entrenamiento, validación y testing. Entre más se acerquen los puntos azules a la recta roja, mejor es la calibración.	80
Ilustración 17: Calibración de Sensor NO: Curva de aproximaciones obtenidas sobre el sensor Alpha-Sense NO-B4. La recta roja es la curva de ajuste entregada por la regresión lineal, y los puntos azules representan los cruces entre el dato del sensor bajo costo y el valor en ese momento reportado por SINCA. Los resultados se dividen en tres conjuntos de datos: entrenamiento, validación y testing. Entre más se acerquen los puntos azules a la recta roja, mejor es la calibración.	80
Ilustración 18: Calibración de Sensor NO ₂ : Curva de aproximaciones obtenidas sobre el sensor Alpha Sense NO2-B43F. La recta roja es la curva de ajuste entregada por la regresión lineal, y los puntos azules representan los cruces entre el dato del sensor bajo costo y el valor en ese momento reportado por SINCA. Los resultados se dividen en tres conjuntos de datos: entrenamiento, validación y testing. Entre más se acerquen los puntos azules a la recta roja, mejor es la calibración.	80

Ilustración 19: Calibración Sensor MP2.5: Comparación entre mediciones obtenidas por el prototipo obtenidas por el prototipo del Producto 5 y las mediciones reportadas por la estación del SINCA Parque O'Higgins. Entre mayor sea el traslape entre las curvas, mejor es la calibración.....	81
Ilustración 20: Calibración de Sensor NO: Comparación entre mediciones obtenidas por el prototipo del Producto 5 y las mediciones reportadas por la estación del SINCA Parque O'Higgins. Entre mayor sea el traslape entre las curvas, mejor es la calibración.	81
Ilustración 21: Calibración Sensor NO2: Comparación entre mediciones obtenidas por el prototipo del Producto 5 y las mediciones reportadas por la estación del SINCA Parque O'Higgins. Entre mayor sea el traslape entre las curvas, mejor es la calibración.	81

Introducción

En la actualidad, la contaminación del aire supone un riesgo tanto para el ambiente como para la salud de la humanidad de manera mundial. Según la OMS³⁰, en el año 2019, se estimaron que los contaminantes exteriores provocan cada año 4,2 millones de muertes prematuras, esto debido a la exposición de material particulado fino, siendo la causa de enfermedades cardiovasculares y respiratorias. También estima que en el 2019 “aproximadamente el 68% de las muertes prematuras relacionadas con la contaminación del aire exterior se debieron a cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares, el 14% se debieron a enfermedades pulmonares obstructivas crónicas, el 14% se debieron a infecciones agudas de las vías respiratorias bajas y el 4% de las muertes se debieron a cánceres de pulmón.”.

Mitigar aquellos contaminantes para que no sigan afectando el bienestar de la población, requiere adoptar medidas por partes de normativas locales, nacionales y regionales a cargo de sectores como de energía, transporte, gestión de desechos, planificación urbana y agricultura.³⁰

Para ello, el Gobierno Regional (GORE) implementa medidas para fomentar un transporte sostenible y reducir la exposición de los contaminantes en la Región Metropolitana, beneficiando especialmente a quienes utilizan la bicicleta como medio de transporte. En este marco, se impulsa el proyecto “Ciclovías Inteligentes y Transporte Sostenible para la Región Metropolitana”, desarrollado bajo el programa “Cities Project”. Este modelo busca intercambiar capacidades técnicas y buenas prácticas entre Hangzhou (China) y Santiago (Chile), promoviendo soluciones innovadoras que contribuyan a un transporte más limpio y eficiente para la población ciclista.³³

La realización del proyecto mencionado requiere la monitorización de los contaminantes existentes en el aire y la cuantificación del flujo vehicular presente en las calles de la Región Metropolitana, con el fin de segregar aquellas vías que presenten mayores emisiones y un riesgo para la salud humana. De igual forma se tiene en cuenta las ciclovías ya existentes para la expansión de la nueva red de ciclovías.

En base a lo descrito previamente, esta memoria busca implementar un plan de monitoreo de los contaminantes que afecten la calidad del aire. Para ello, se utilizan sensores de calidad de aire capaces de medir continuamente el material particulado y otros gases presentes en el ambiente, estos permiten estudiar el comportamiento de los contaminantes bajo diversas condiciones y las tendencias que se pueden generar, permitiendo predecir en el futuro el comportamiento que presentará y poder realizar acciones preventivas respecto a esto.

La estructura de la memoria consta de cuatro capítulos, el primero se realiza con el fin de conocer los contaminantes que afectan a la calidad del aire, las redes de monitoreos existentes en Chile y también se busca comprender en mayor profundidad los sensores de calidad de aire, los tipos de sensores que existen y las características que estas presentan, además de conocer aquellos que estén presentes en el mercado actual.

El segundo capítulo, consiste en la selección de un dispositivo de calidad utilizando la investigación del primer capítulo y definiendo criterios de selección como parte de la metodología, permitiendo reducir las opciones presentes.

El tercer capítulo abarca la propuesta del plan de monitoreo utilizando como metodología el análisis de los comportamientos de los contaminantes reportados por el sensor, permitiendo comprender el contexto global de la situación para dar una solución a la problemática y mediante esto, realizar la

estructura del plan de monitoreo, permitiendo la transmisión de la información en las plataformas de acceso público.

Por último, se tiene el cuarto capítulo que realiza la validación del sensor de calidad seleccionado y el plan de monitoreo propuesto.

La memoria utiliza como antecedente el Informe Final Producto 4 y del Producto 5, la primera realiza un plan de monitoreo de contaminantes enfocado en la red de ciclovías, donde se propone tres redes de monitoreo con 50, 100 y 150 puntos de control, sobre las redes de ciclovías existentes y proyectadas para construcción. Además, propone una serie de dispositivos de calidad de aire para su posible uso, estimando los costos asociados a estos.³³

El segundo informe indica el diseño de la implementación de un dispositivo que captura los datos en transportes y sus contaminantes en la red de ciclovía del gran Santiago. Su propuesta de solución es la creación de dos módulos que se integren en el dispositivo IoT. El primer módulo es de calidad del aire, el cual es un conjunto de sensores independientes de MP2.5, NO y NO₂, donde sus datos son almacenados de manera local, permitiendo la generación de registros con las mediciones de los contaminantes dentro de un intervalo de tiempo predefinido. Por otra parte, se tiene un módulo de detección de objetos viales, la cual recopila la cantidad de vehículos y objetos mediante datos compilados en intervalos de tiempos predefinidos.³⁴

El dispositivo del Producto 5 es utilizado dentro de la memoria como una posible solución para utilizarlo en el monitoreo en escala mayor en el proyecto de ciclovías. Sin embargo, para efectos de la memoria no se realizará un análisis del contador de vehículos.

Considerar que la memoria presente realiza un análisis de los contaminantes dentro de periodos que no se presentan mayor contaminación, es decir, excluye la temporada de invierno que es la que suele presentar un aumento de flujo vehicular y otras fuentes de contaminación. Por lo que la muestra de datos presentada radica en las estaciones de otoño y primavera.

Objetivos

El objetivo general del presente trabajo es determinar una metodología para el monitoreo de emisiones atmosféricas a través de sensores en diversos puntos de la Región Metropolitana.

Para cumplir el objetivo general presentado, se consideran los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar el impacto del transporte público en la calidad del aire de la Región Metropolitana de Santiago.
2. Determinar un dispositivo que cumpla con los requisitos al menor costo posible.
3. Desarrollar una propuesta para la implementación de un plan de monitoreo que se integre a las redes de monitoreo existentes.
4. Validar el dispositivo y el plan de monitoreo seleccionado anteriormente.

1. Capítulo 1. Estado del Arte

1.1. Contaminantes emitidos por el transporte

La contaminación del aire surge cuando se liberan gases o partículas finas al ambiente, alterando la composición química de la atmósfera provocando efectos nocivos para la salud o bienestar humano. Dicha contaminación tiene como principal fuente las actividades antropogénicas, específicamente el uso de combustibles fósiles en procesos industriales y transporte. Dentro de los contaminantes provenientes del transporte se tiene principalmente el CO₂, CO, NO_x, material particulado (MP) y el O₃ (proveniente del NO₂ y NO). También hay que considerar que se producen otros tipos de contaminantes que pueden ser emitidos a la atmósfera tales como los compuestos orgánicos volátiles (COVs) y partículas totalmente suspendidas (PTS).²

Según el RETC², los contaminantes mencionados anteriormente se pueden definir y producir de la siguiente manera:

El dióxido de carbono, desde ahora en adelante CO₂ es un gas de efecto invernadero cuyo impacto esta dado directamente por el calentamiento global, siendo este uno de los contaminantes más emitidos en términos de cantidad (tonelada).

Los óxidos de nitrógeno, de ahora en adelante NO_x, representan a una familia de gases altamente reactivos que corresponde a una mezcla de NO (óxido nítrico) y NO₂ (dióxido de nitrógeno). Se forman principalmente durante la combustión a altas temperaturas, como en motores, procesos industriales o la quema de biomasa, debido a la oxidación del nitrógeno del aire.

El material particulado (MP) puede presentarse de diversas formas tanto en tamaño, como composición y origen. La clasificación de un material particulado se dará por su tamaño, permitiendo la identificación de las características del tipo de transporte, remoción y origen del contaminante. Dicho esto, se define el material particulado 2,5 (MP2,5) como una partícula fina, la cual tiene un tamaño aerodinámico menor o igual a 2,5 micrómetros. Estas se producen por el proceso de combustión, especialmente en motores de combustión interna, también por emisiones difusas como la quema de leña, incendios forestales o urbanos, entre otras. Por otra parte, se tiene el MP10 que corresponde a una fracción gruesa del material particulado y representa aquellas partículas con tamaño aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros. El origen de este estará dado por actividades de construcción, movimiento o transporte, dispersión o por acciones mecánicas específicas. El tamaño del MP10 permite que este sea respirable, generando problemas al sistema respiratorio e inmunológico de un ser humano.

1.2. ¿Cómo el transporte libera estas concentraciones a la atmósfera?

Un vehículo puede emitir estos contaminantes mediante 5 formas principales: Partidas en frío; tubo de escape; desgaste de frenos y neumáticos; emisiones evaporativas.¹

- Las partidas en frío se refieren a cuando el motor se encuentra en frío y este empieza su funcionamiento hasta lograr una temperatura estable, logrando así la emisión por medio de la combustión del motor.

- Del tubo de escape se emiten los gases nocivos producidos por la combustión del motor al encontrarse este en una temperatura estable.
- El desgaste de frenos y neumáticos se dará cuando los vehículos se detienen y se produce la emisión por el desgaste de los neumáticos en el pavimento.
- Con respecto a las emisiones evaporativas son emisiones COV producto de la evaporación del combustible presente en los vehículos (detenciones en caliente, durante el recorrido y durante el día cuando no se encuentra en movimiento).
- Emisiones de polvo suspendido causada por la suspensión del polvo existente en el pavimento.

Para una mejor visualización del porcentaje de contaminantes provenientes del transporte se muestran unas gráficas de las emisiones totales por contaminante del año 2022 en la región Metropolitana.

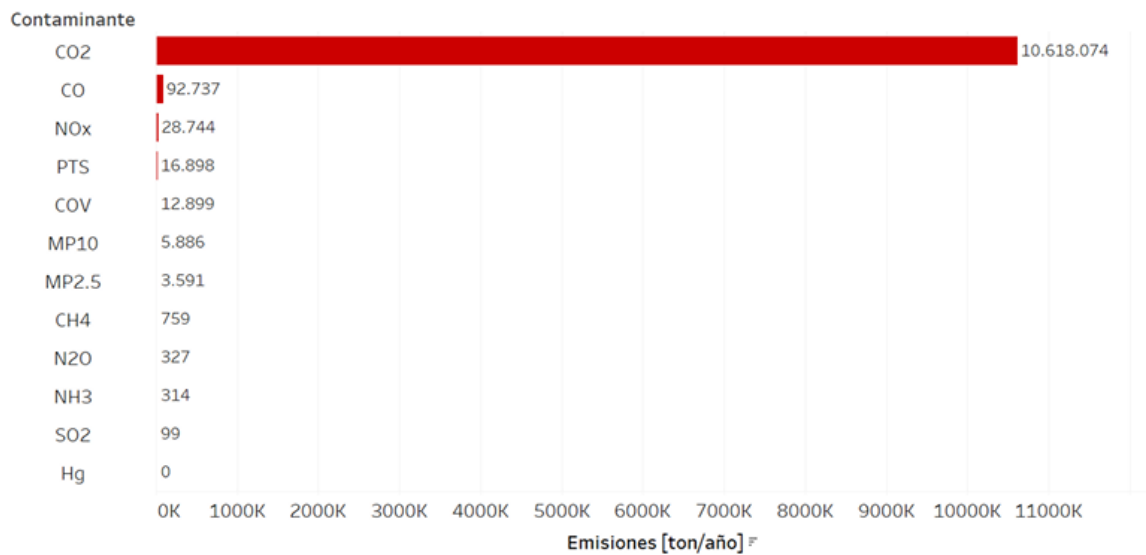


Gráfico 1: Emisiones totales por contaminante 2022 [ton/año] en la región Metropolitana. Fuente: Dictuc¹

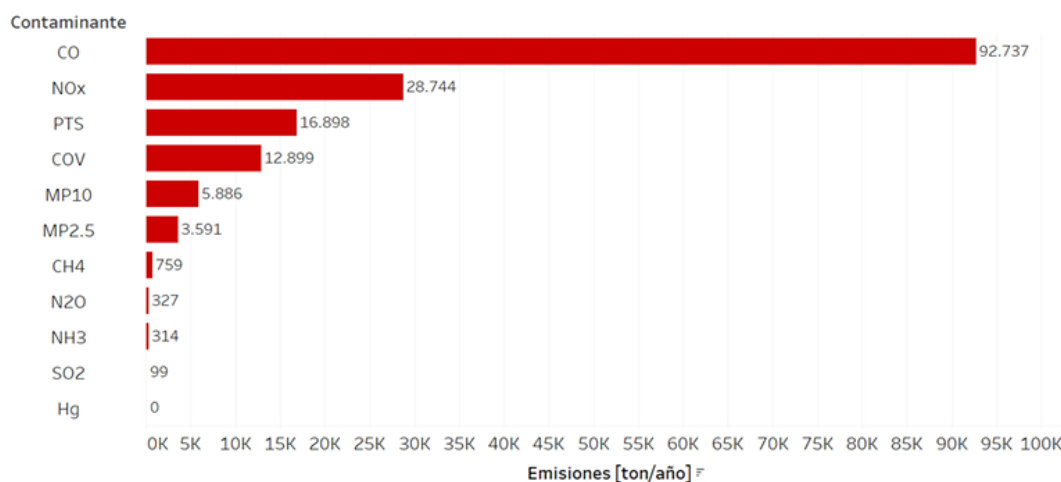


Gráfico 2: Emisiones totales por contaminante 2022 [ton/año], excluyendo CO₂ en la región Metropolitana.
Fuente: Dictuc1

De los gráficos anteriores, se observa una predominancia significativa del CO₂, destacando su impacto ambiental comparado con otros gases. Sin embargo, contaminantes como NO_x, PTS, COV, MP10 y MP2.5, que superan las 1000 toneladas anuales, también representan cifras alarmantes que afectan la calidad del aire. Los gráficos 1 y 2 permiten discriminar los contaminantes de alta emisión del resto, para poder seleccionar aquellos que serán monitoreados por sensores de calidad de aire.

1.3. ¿Qué efectos nocivos trae a la salud de los ciclistas la contaminación del aire?

De acuerdo con Oscar Díaz, Néstor Rojas, Alba Rodríguez³, los ciclistas son los individuos que más se ven afectados por la contaminación atmosférica, esto debido a que las actividades físicas que estos realizan son a distancias muy cercanas a las fuentes de emisión vehicular. Con respecto a esta actividad, a pesar de que es una solución para reducir las emisiones de los contaminantes y mejorar la calidad del aire, resulta ser un alto factor de riesgo para aquellos que quieran realizarla, por la cantidad de contaminantes que inhalan.

Con respecto al material particulado, las diferencias de tamaño y su composición química potencia ciertos efectos toxicológicos más que otros con variaciones en el sitio de deposición, adsorción dentro del sistema respiratorio y capacidad de inducir inflamación y muerte celular. El MP10, afecta a la tasa de fertilidad en humanos disminuyéndola, el MP2,5 altera la función respiratoria en personas sanas. Por último, partículas ultrafinas que tienen un diámetro menor a 0,1 micrómetros, puede causar enfermedades cardiovasculares (particularmente crisis hipertensivas) y daño al ADN.

Otros contaminantes que se estudian es el dióxido de nitrógeno y el carbono negro (BC), siendo ambos contaminantes nocivos para la salud humana, por lo cual es importante disminuir la exposición de estos en la población.

Aunque la bicicleta es una excelente alternativa para evitar la congestión vehicular y fomentar un estilo de vida más saludable a través del deporte, los altos niveles de contaminantes emitidos por los

vehículos impiden que ciclistas y corredores adopten plenamente este estilo de vida. Por lo tanto, es crucial monitorear estos contaminantes.

1.4. Red SINCA

El Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) del Ministerio de Medio ambiente, es una herramienta que tiene como objetivo mejorar el conocimiento, vigilancia y gestión de la calidad del aire. ⁴

En el portal de SINCA se puede encontrar las mediciones de calidad del aire en línea, un seguimiento histórico de las mediciones de calidad del aire y meteorología, antecedentes de las estaciones de monitoreo, documentación de la calidad del aire y monitoreo, y otros enlaces a sitios web de interés.

Esta presenta la información con tres tipos de categorías, donde están los registros no validados, los registros preliminares y los registros oficiales.

- No validados: Información recibida en línea de forma automática, desde las estaciones de monitoreo que se encuentren conectadas al sistema.
- Preliminares: corresponden a datos validados en una primera instancia, efectuada por los operadores de la estación donde se corrigen los datos desfasados o se eliminan aquellos que corresponden a fallas o mantenciones como las calibraciones de los instrumentos.
- Oficiales: corresponden a datos validados previamente por los operadores de las estaciones, que pasan por un segundo proceso de validación por algún organismo estatal que tenga competencias sobre los datos.

A continuación, se presenta un mapa en vivo de la calidad del aire de la región Metropolitana que entrega la red SINCA, en donde, se miden los contaminantes MP, Ozono, Dióxido de Azufre, NO₂ y CO.

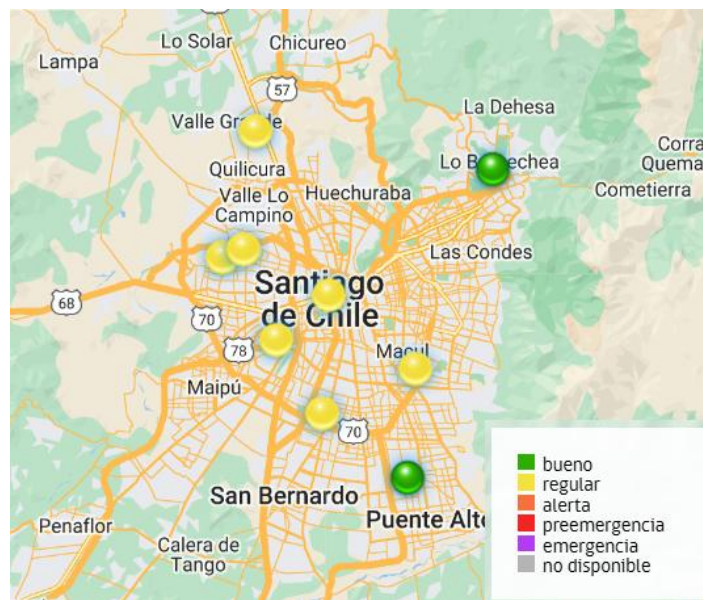


Ilustración 1: Mapa en vivo de la calidad del aire en la Región Metropolitana entregado por SINCA a las 00:44 a.m. un 12 de julio del 2024.

Otro formato que nos entrega la red SINCA para saber el nivel de concentración del contaminante es a través de su Red de Monitoreo en línea.

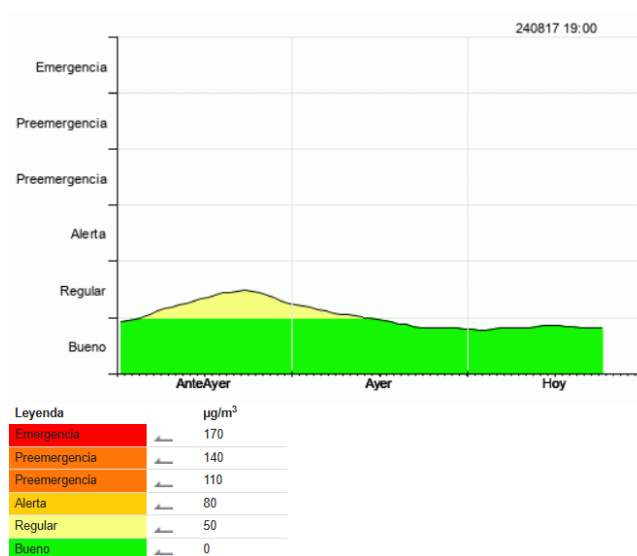


Ilustración 2: Gráfico de MP2,5 otorgado por la Red de Monitoreo en línea de la comuna Puente Alto a las 19:00 p.m. un 17 de agosto del 2024.

Aunque la Ilustración 1 presenta la calidad del aire en distintas comunas de la región Metropolitana, su precisión es limitada y solo abarca ciertos sectores de Santiago. De hecho, la misma SINCA señala que estos datos no están validados operacionalmente y deben considerarse preliminares. Por lo tanto, no reflejan de manera concreta la calidad del aire, sino que proporcionan una visión general.

1.5. Normas de calidad de aire

A raíz de evaluar la calidad del aire en distintas zonas y de implementar medidas efectivas para reducir la exposición a contaminantes peligrosos, surgen las normas de calidad del aire como una herramienta esencial para la gestión ambiental. Estas normas consisten en parámetros establecidos por las autoridades ambientales que determinan límites máximos permitidos para la concentración de diferentes contaminantes en el aire, con el objetivo principal de proteger la salud humana, preservar el bienestar de las comunidades y minimizar los impactos negativos en el entorno.

En particular, las normas de calidad del aire buscan garantizar que las personas estén expuestas a niveles de contaminación que no representen riesgos significativos para su salud, especialmente frente a contaminantes como el material particulado 2.5 y el dióxido de nitrógeno.

En este contexto, tanto la Organización Mundial de la Salud (OMS) como las normativas chilenas han establecido parámetros específicos para la calidad del aire, considerando sus impactos en la salud y la particularidad de los entornos locales. A continuación, se presentan los límites establecidos por ambos estándares para MP2.5 y el NO₂.^{9 10}

1.5.1. Organización Mundial de la Salud

Tabla 1: Parámetros de promedio de la calidad de aire según la OMS.

Contaminante	Periodo del promedio	AQG	Conversión
PM2.5	24 horas	15 µg/m ³	-
	Anual	5 µg/m ³	-
NO ₂	1 hora	200 µg/m ³	106.38 ppbv
	24 horas	25 µg/m ³	13.29 ppbv
	Anual	10 µg/m ³	5.31 ppbv

1.5.2. Norma Chilena

Tabla 2: Parámetros de promedio de la calidad de aire según la Norma Chilena.

Contaminante	Periodo del promedio	AQG	Conversión
PM2.5	24 horas	50 µg/m ³	-
	Anual	20 µg/m ³ N	-
NO ₂	1 hora	200 µg/m ³ N	106.38 ppbv
	24 horas	100 µg/m ³ N	53.19 ppbv
	Anual	40 µg/m ³ N	21.27 ppbv

Niveles para concentración de 24 horas de MP2,5 que originan situaciones de emergencia ambiental:

Tabla 3: Niveles de concentración del material particulado 2.5.

Niveles de emergencia	Rango Niveles en µg/m ³ N
Alerta	80 – 109
Preemergencia	110 - 169
Emergencia	≥ 170

Niveles para concentración de 1 hora de NO₂ que originan situaciones de emergencia ambiental:

Tabla 4: Niveles de concentración del dióxido de nitrógeno.

Niveles de emergencia	Rango Niveles en µg/m ³ N
Nivel 1	500 - 799
Nivel 2	800 – 1.399
Nivel 3	1400 o superior

1.6. Sensores de calidad de aire

Un sensor, según U.S. Government Accountability Office⁵, corresponde a un dispositivo integrado el cual un usuario puede medir uno o más contaminantes en el aire, solo desplegando un “listo para usar”. Estos sensores incluyen componentes de detección que interactúa física o químicamente con el contaminante objetivo para generar una señal. Además, también puede incluir componentes como una carcasa, un microprocesador y una fuente de alimentación.

Los sensores pueden clasificarse en cuatro tipos, su clasificación estará dada por la forma de medir el contaminante, este puede ser por dispersión de luz, electroquímica, semiconductor de óxido metálico y fotoionización.

A continuación, se presenta la Tabla 5, la cual indicara los tipos de contaminantes objetivos que miden los sensores mencionados anteriormente y sus características respectivas.

Tabla 5: Tipos de sensores de calidad de aire con su contaminante objetivo y características asociadas. Tabla extraída de GAO⁸

Tipo de sensor	Contaminante objetivo en el aire ambiente	Características
Sensores de dispersión de luz	Material particulado de fracciones de diferentes tamaños: MP1, MP2.5, MP10 (y a veces otras fracciones de tamaño)	- Precisión razonable para MP2.5 - No es una medición de masa directa y requiere calibración para informar los valores como un nivel de contaminante (por ejemplo, en masa por volumen de aire). - Requiere suposiciones sobre la densidad de partículas y la distribución del tamaño para derivar cantidades para cada clase de tamaño de partícula (p. ej., PM2.5 o PM10) - Algunos no pueden detectar partículas de menos de 0,3 micrómetros (p. ej., partículas ultrafinas de los gases de escape de los vehículos) - La mayoría no puede medir de manera confiable las PM10 (p. ej., polvo) - No puede medir la composición química de las partículas
Sensores electroquímicos	Contaminantes en fase gaseosa, incluidos el ozono (O ₃), los óxidos de nitrógeno (NO _x), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de	- Responde a los contaminantes no objetivo y produce una lectura incluso en ausencia de un

	azufre (SO ₂) y los compuestos orgánicos volátiles totales (COV)	contaminante objetivo (también conocido como sensibilidad cruzada), pero los sensores electroquímicos pueden funcionar mejor para algunos objetivos (por ejemplo, monóxido de carbono u ozono) cuando se pueden tener en cuenta los contaminantes no objetivo
Sensores semiconductores de óxido metálico	Contaminantes en fase gaseosa, incluidos O ₃ , CO, NOX, COV totales	- Sujeto a deriva y disminución de la sensibilidad con el envejecimiento
Detectores de fotoionización	COV totales	- No se puede correlacionar con la concentración de contaminantes cuando hay más de un COV presente - No puede identificar qué COV están presentes - Responde a contaminantes no objetivo y produce una lectura incluso en ausencia de contaminante objetivo - No puede detectar algunos COV en absoluto

Con respecto a las concentraciones mencionadas en la sección “Contaminantes emitidos por el transporte”, tanto los sensores electroquímicos como los sensores de dispersión de luz cumple con la medición de los contaminantes derivados del transporte. Aunque los sensores de dispersión puedan medir de forma más precisa el MP2.5, este cuenta con una dificultad para medir el MP10 el cual su medición es igual de importante que el MP2.5 pues este se presenta con mayor concentración en la región metropolitana que el MP2.5. Con respecto a los sensores electroquímicos estos nos dan una mayor gama de medición de los contaminantes, demuestra ser más completo que los sensores semiconductores de óxido metálico o los de fotoionización, solo sería necesario un mantenimiento para no perder su sensibilidad debido al envejecimiento.

1.6.1. Funcionamiento de los sensores

La Comisión Europea¹¹ define el funcionamiento de los sensores electroquímicos, fotoionización, óxido metálico, contadores ópticos de partículas y sensor ópticos de la siguiente forma:

Sensores electroquímicos: Se produce una reacción química entre los gases en el aire y un electro en un líquido dentro del sensor. Estos miden NO₂, SO₂, O₃, NO y CO. La ventaja que presenta estos sensores es que tiene un costo medio alrededor de 50 a 150 euros. Presenta una buena sensibilidad y tiene un tiempo de respuesta rápido (30 a 200 s). Como desventaja es muy sensible a las variaciones de temperatura y humedad, además muestra reactividad cruzada con tipos de moléculas similares.

Sensores óxido metálico: Los gases presentes en el aire reaccionan sobre una superficie del sensor y estas modifican su resistencia. Estos miden NO₂, O₃ y CO. Como ventaja, este presenta un bajo coste alrededor de 10 a 15 euros por sensor, tiene buena sensibilidad. Como desventajas, los resultados se ven afectados por las variaciones de temperatura y humedad, también tiene un tiempo de respuesta prolongado de 5 a 50 minutos y la salida depende del historial de entradas anteriores. Por último, presenta inestabilidad.

Detector de fotoionización: El sensor ioniza los COV y mide la corriente eléctrica resultante. Este solo mide COV. Este tiene un costo aproximado de 400 euros por un sensor a 5000 euros por un dispositivo manipulado. Presenta buena sensibilidad. Como efectos, presenta dependencia limitada a la temperatura y humedad. También tiene un tiempo de respuesta muy rápido. La desventaja del sensor es su carencia de selectividad, ya que reacciona a todos los COV que pueden ser ionizados.

Contadores ópticos de partículas: Detectan la contaminación por partículas midiendo la luz dispersada por las partículas. Mide material particulado. Presenta un costo moderado de 300 euros por sensor. Proporciona un tiempo de respuesta rápido (1 s). Su sensibilidad es de un rango de 1 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]. Además, puede identificar el tamaño de la partícula. Su desventaja es que la conversión de recuentos de partículas a masa MP se basa en un modelo teórico y que su señal de medida depende de una variedad de parámetros como la forma de la partícula, su color y densidad, la humedad, etc.

Sensores ópticos: Detectan gases como el CO y CO₂ mediante la medición de la absorción de luz infrarroja. Su costo es moderado, entre 100 y 350 euros por sensor. Presentan una buena sensibilidad para el CO₂ y, como ventaja, tienen una excelente selectividad gracias a los espectros característicos del CO₂. Su tiempo de respuesta varía entre 20 y 120 segundos. Como desventaja, presentan limitaciones en el tiempo de calibración y requieren correcciones debido a los efectos de la temperatura, humedad y presión

1.6.2. Aspectos por considerar de los sensores

Para la selección de los sensores hay que considerar ciertos aspectos, como las condiciones ambientales, la concentración del contaminante, el diseño, edad, instalación, mantenimiento y el procesamiento de datos.⁵

Los hardware interiores del sensor son muy sensibles a las temperaturas, humedad y otras condiciones. Esto debido a que no presentan una buena protección, por lo que es importante no someterlo a temperaturas muy extremadas o variables que puedan provocarle daño o fallas en la lectura.

El rendimiento del sensor depende de las concentraciones del contaminante, ya que la sensibilidad puede no ser la suficiente para medir el contaminante.

El diseño también afecta el rendimiento de diferentes formas, por ejemplo, la protección de los componentes internos o la forma en el contaminante llega al componente.

A medida que pasa el tiempo, el sensor se verá afectado por su mismo deterioro, disminuyendo así su rendimiento. La vida útil de cada sensor varía según su tipo, las condiciones ambientales y el mantenimiento. En general, estos tienen una garantía de funcionamiento de 1 a 5 años, después de esto deben ser reemplazadas (reemplazo de todo el sensor o solo un componente).

Una ubicación inadecuada de los sensores puede entregar errores en la lectura de la calidad del aire. Se deben instalar de cierta posición que permita el flujo de aire sin obstrucción y no estar tan cerca de fuentes de contaminación concentradas para garantizar que se refleje la calidad de aire circundante.

El mantenimiento debe ser periódico para permitir la precisión de los sensores. Eliminando los polvos y suciedad presentes, reemplazando los filtros y otras piezas. El sensor debe estar libre de insectos ya que estos provocan mediciones anormales. Además, en el mantenimiento se debe incluir la recalibración del dispositivo. En el caso que se pierda la sensibilidad, se debe reemplazar el sensor.

Las técnicas como la calibración y el promedio se emplean para mejorar la precisión de los sensores. Sin embargo, una calibración incorrecta puede resultar en datos sesgados, comprometiendo la fiabilidad de las mediciones del sensor.

En relación con lo mencionado, es crucial mantener el sensor en condiciones ambientales óptimas para su funcionamiento efectivo. Asegurarse de que se cumplan los criterios anteriores contribuirá a prolongar la vida útil del dispositivo y garantizará mediciones más precisas.

1.7. Sensores de bajo costo operados por distintas entidades

De acuerdo con Egusphere⁶, para la selección de los sensores de calidad de aire se utiliza los siguientes criterios:

- Contaminantes medidos: Material particulado PM, ozono (O₃), óxidos de nitrógeno (NO, NO₂, NO_x), óxidos de azufre, monóxido de carbono y plomo.
- Costo de un paquete de sensor individual no puede exceder los 10,00 USD o su equivalente.
- El paquete de sensores debe medir al menos un compuesto en fase gaseosa.
- La red de sensores debe estar fijada en el suelo
- La red de sensor debe desplegarse al aire libre
- Los sensores deben instalarse en una ubicación fija (Se excluyen dispositivos móviles)

Se debe entender como “sensor” un componente individual que mide un contaminante específico de interés. Un “paquete de sensores” se refiere al instrumento de medición completo, que incluye uno o más sensores, una placa de circuitos, un sistema para la recopilación de datos y un medio para extraer la muestra ambiental a través de los sensores, como un ventilador o bombas. Un grupo de varios paquetes de sensores desplegados en una ubicación predeterminada se denominará “red de sensores”. Por último, los “nodos” serán paquetes de sensores individuales que forman parte de una red de sensores.

A continuación, se presenta en las Tablas 6,7,8 y 9 sensores cuasi permanentes operados por distintos entes tales como empresas privadas, el gobierno, instituciones de investigación o universidades con su respectiva sede, los contaminantes que miden, si presentan un mapa de datos en vivo, si utilizan un interfaz de programación de aplicaciones, desde ahora en adelante API, que permite acceder a datos históricos y otras características extra que no entran en las categorías mencionadas.

Una red de sensores cuasi permanentes se define como un sensor que tiene la capacidad de medir por al menos dos años o lo que resta de su vida útil. Estos incluyen esquemas de calibración a nivel nacional o global, y pueden incluir un panel de control en vivo para la visualización de datos. Muchos de los sensores que se mostraran a continuación no enumeran procedimientos de calibración específicos.

Tabla 6: Sensores de calidad de aire cuasi permanentes operadas por empresas privadas con sus respectivas características.

Cuasi permanentes operadas por empresas privadas	Sede	Contaminantes	Mapa de datos en vivo	API	Extra
Purple Air	Estados Unidos	PM y VOC	AirView	Sí	Red de sensores más grande del mundo. Configuración láser.
IQAir	Suiza	Co2 y PM	Sí	Sí	Aplicación AirVisual utiliza datos meteorológicos y satelitales globales.
Clarity	Berkeley, EE. UU	NO2, O3 y PM	OpenMap (incluye datos tanto de los nodos como de las estaciones de referencia gubernamentales)	Tiene herramienta de datos que permite al usuario ver y trazar datos históricos.	

Con respecto a las empresas privadas de la Tabla 6, esta fabrica y vende ampliamente los paquetes de sensores con fines de lucro. Contienen mapas que incluyen datos de monitores regulatorios u otras redes de sensores. Se enfocan en el índice de calidad del aire (AQI). No tienen disponibles datos históricos para su descarga o pueden requerir el uso de una interfaz de programación de aplicaciones API. (Desventaja para los usuarios que quieren una inspección más detallada).

Tabla 7: Sensores de calidad de aire cuasi permanentes operadas por el gobierno con sus respectivas características.

Cuasi permanentes operados por el gobierno	Sede	Contaminantes	Mapa
Programa AirNow	Estados Unidos	PM y Ozono	AirNow. Fire and Smoke
Canary de Lunar Outpost	Denver	O3, CO, NO, NO2, H2S, SO2 y COV	Sí

Tabla 8: Sensores de calidad de aire cuasi permanentes operadas por instituciones de investigación o universidades con sus respectivas características.

Cuasi permanentes operadas por instituciones de investigación o universidades	Sede	Contaminantes	Mapa en vivo	Extra
BEACO2N (Berkeley)	San Francisco	CO ₂ , O ₃ , NO ₂ , CO y PM	Sí	Sus datos también cuentan con calibraciones sólidas basadas en la comparación con instrumentos de grado de referencia.
SmartCitizen	España	CO, CO ₂ , NO ₂ , COV y PM	Sí	Ofrecen dos variedades de diferentes paquetes de sensores: un kit de construcción propia, dirigido a científicos ciudadanos y educadores, y una plataforma de sensores más robusta diseñada para uso a largo plazo en exteriores,

Tabla 9: Sensores de calidad de aire cuasi permanentes (campañas) operadas por empresas privadas con sus respectivas características.

Campañas operadas por empresas privadas	Sede	Contaminantes	Mapa en vivo	API	Extra
Airly	Polonia y California	CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₃ y PM	Sí, incluye datos de estaciones de monitoreo administradas por el gobierno.	Sí	Calibración de sensor regular
MODULAIR (de QuantAQ)	Estados Unidos	CO, CO ₂ , NO, NO ₂ , O ₃ y PM	Acceder a la nube QuantAQ	Sí	Inspección anual y recalibración del sensor
Bettair	Barcelona	CO, CO ₂ , NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , H ₂ S Y PM	Cartografía	Software propio	Vende “cartuchos” de sensores que están destinados a ser recomprados cada dos años

Kunak Air	España	CO, O3, NOx, SO2 y PM	Kunak cloud	Sí	
AQMesh	Reino Unido	CO, CO2, NO, NO2, O3, SO3, COV y PM. Además, H2S.	N/D	Sí, solo para suscriptores.	
Ellona (WT1)	Francia	H2S, NH3, HCl, H2O2, HCHO, CH4 y H2, CO, CO2, NO, NO2, O3, SO2, COV y PM	Sí	Sí	Sus procedimientos de procesamiento, calibración y visualización de datos están ocultos detrás de un muro de pago solo para usuarios.
Prana Air	India	CO, CO2, NO, NO2, O3, SO2, COV, H2S, NH3 y PM	N/D	Accesibilidad de datos en sitio web, aplicaciones móviles, TV.	Paquetes de sensores se agregan a aplicación AQI.
Oizom	India y Francia	CO, CO2, COV y PM.	Sí	Sí	Calibración integrada no especificada
ekoNet	Serbia	CO, CO2, NO, NO2, O3, SO2 y PM.	Sí	Sí	La visualización de datos basada en la web y en aplicaciones está limitada a los suscriptores, con tres paquetes diferentes disponibles: básico, estándar y avanzado.

En el mercado actual hay una gran variedad de sensores para elegir, dentro de los que son de interés, las empresas privadas muestran la mayoría de los sensores que miden los contaminantes objetivos, además de ofrecer una gran gama de mediciones de otros gases. Como característica general, estos presentan los datos de manera similar, es decir, que contienen un dashboard donde muestran los datos y mapas en vivos que permiten conocer como es la calidad del aire en tiempo real. Los sensores que demuestran ser comprometedores serían Clarity, Airly, QuantAQ, Bettair, KunakAir, AQMesh, Ellona (WT1), Prana Air y ekoNet.

2. Capítulo 2. Selección de sensor de calidad de aire.

Para la selección de un sensor de calidad de aire que se implemente en la Región Metropolitana es necesario considerar el entorno al cual estará sometido el dispositivo. Según la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile⁷, las características climáticas que están presente en la región son de tipo mediterránea de estación seca larga e inviernos lluviosos. Este presenta una temperatura anual de 14 °C, sin embargo, Santiago presenta temperaturas extremas dependiendo la estación del año, pudiendo llegar a 0°C en invierno y superando los 30°C en verano. Mientras que el porcentaje de humedad varía desde 52% hasta 66%, según Climate Data⁸. Además, considerando lo mencionado anteriormente en el Capítulo 1, donde se analizan los contaminantes provenientes del transporte público siendo los más nocivos para la salud humana el material particulado 2,5 y el dióxido de nitrógeno, se procede a seleccionar diversos sensores que cumplan con los requisitos que a continuación se definirán mediante la siguiente metodología.

2.1. Metodología para la selección de sensor

1. **Búsqueda dentro del mercado:** Analizar sensores de calidad de aire en el mercado que sean utilizados por distintas entidades, éstas pueden ser tanto privadas como públicas.
2. **Criterios de selección:** Definir criterios de selección que sea compatible con la problemática inicial, tales como que deben medir principalmente MP2,5 y NO₂, que utilicen sensores de dispersión de luz y electroquímicos para una mejor precisión, se considera también su calibración, el tiempo de entrega de datos, que posean mapas en vivos, acceso a datos históricos, el tipo de conectividad, que resistan a las condiciones ambientales del exterior y que estén al menor costo posible.

2.2. Criterios de selección

Como se menciona en la metodología se definieron ciertos criterios de selección que permitirá acotar la gran variedad de sensores de calidad de aire presente en el mercado este con el fin de elegir aquellos que permitan que se cumpla el objetivo general. Para ello se define a mayor profundidad y se argumenta la decisión del factor seleccionado.

- 1) **Contaminantes objetivos:** A pesar de la cantidad de contaminantes provenientes del transporte, se estudiarán aquellos que su exposición pone en mayor riesgo a la salud de los seres humanos, centrándonos en el MP2,5 y en el NO₂. Hay que considerar también las normas de calidad del aire establecida por la ley chilena, permitiendo tener una noción del rango de exposición que debe medir el sensor de calidad de aire. Para el material particulado 2,5 se considera emergencia cuando la concentración de 24 horas es mayor a 170 [µg/m³], por lo tanto, el rango debe contener dicho número y por conveniencia tener un máximo mayor a 170 [µg/m³]. Por lo que se establece como requisito que el rango del MP2,5 sea mínimo entre 0-1000 [µg/m³]. Por otra parte, para el dióxido de nitrógeno se considera emergencia ambiental con una hora de concentración cuando este es mayor a 1400 [µg/m³], que equivale a 745 [ppb] aproximadamente. Sin embargo, la red Sinca indica que la emergencia ambiental es cuando la concentración es mayor a 1596 [ppb], ya que esta considera la norma decretada en el año 2002. Tomando en consideración ambos valores, se determina que el rango del NO₂ debe tener un máximo mayor a 1596 [ppb], por lo tanto, como mínimo su rango debe ser entre 0 a 2.500 [ppb].

- 2) **Tipo de sensor:** De acuerdo con la GAO y la Comisión Europea, existen diversos tipos de sensores para realizar mediciones, sin embargo, para el material particulado solo se tiene disponible el contador de partícula óptico (dispersión de luz), en cambio, para el NO₂ se observan dos tipos de sensores que pueden medir dicho gas, aunque se puede observar más ventaja y más rapidez utilizando un sensor electroquímico a pesar de tener un costo más elevado. Por lo tanto, se establece que los sensores de calidad de aire tengan un dispersor de luz y un sensor electroquímico.
- 3) **Calibración:** Una buena calibración permite una mayor precisión en la medición de los datos, por lo que para la selección de los sensores es necesario saber que tan bien calibrados están, esto se puede ver mediante el coeficiente de determinación R², mientras más cercano sea a 1 más precisos serán las mediciones de los datos. Se determina un R² mayor a 0,8. Además hay que considerar que las especificaciones técnicas demuestren que tan precisos son sus mediciones, la referencia que utilizaron y que cuenten con certificados.
- 4) **Flujo de datos:** Como se espera obtener datos en tiempo real durante el monitoreo, se espera que el tiempo de entrega de datos sea lo más rápido y preciso posible, por lo tanto, se establece una medición máxima de 15 minutos. Además, preferiblemente que la muestra de datos sea mediante un mapa en vivo y tener acceso a los históricos de cada contaminante.
- 5) **Conectividad:** Existen diversos tipos de conectividades que se utilizan en los sensores de calidad de aire tales como Wifi, LTE/ 4G y 5G, LPWAN (LoraWan y NB-IoT), Ethernet y RS-485. Dentro de estas opciones, LTE/ 4G y 5G, LoraWan y NB-IoT son conectividades por considerar, debido a su capacidad de transmitir datos en diversos entornos.
- 6) **Resistencia ambiental:** La durabilidad del sensor de calidad va a depender de que tan resistente sea de los cambios ambientales presentes en el entorno, por lo que se debe considerar un rango de temperatura de 0 ° a 40° C según el clima de la Región Metropolitana. Para asegurar su buen funcionamiento debido a variaciones que pueden aparecer más a futuro, se amplía el rango entre -10 a 45 °C y que resista una humedad de hasta 80% o más.
- 7) **Estructura de costos:** Para poder comparar los costos asociados a la adquisición de cada sensor se propone que dentro de la cotización la empresa entregue servicios como la conexión e instalación de los equipos y que se pueda acceder a los datos dentro de su plataforma. Una vez realizada la cotización se consideran aquellos que presenten un menor precio.

2.3. Análisis de sensores

Del Capítulo 1, Egusphere señaló una gran cantidad de sensores de calidad de aire que cumplían sus criterios establecidos y que fueron categorizados por su operación de entidades privadas y públicas, dentro de ellas existen un grupo de sensores que cumplen con lo mínimo requerido, esto es que tengan como contaminante objetivo el MP2,5 y el NO₂, además de ser sensores que operan en el exterior. De este mínimo requerido tenemos los sensores: Clarity, Airly, QuantAQ, Bettair, KunakAir, AQMesh, Ellona (WT1), Prana Air y ekoNet.

2.3.1. Clarity

De acuerdo con la ficha técnica del sensor Clarity Node-S¹², este corresponde a un dispositivo de monitoreo de calidad del aire que mide tanto material particulado (MP) como dióxido de nitrógeno (NO₂), cuenta con certificación FCC/CE y MCERTS. Además, es autosuficiente, cuenta con recolección solar, batería interna y conectividad celular global, requiere un mínimo mantenimiento y funciona en ubicaciones remotas. El dispositivo cuenta con tecnología de dispersión de luz láser con

calibración remota para la medición del material particulado con un rango de 0-1000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] teniendo una pre-calibración de 0.97 en condiciones óptimas, también posee una tecnología con celdas electroquímicas con calibración remota para el dióxido de nitrógeno con un rango de 0-3000 [ppb] con una pre-calibración de 0.83 en condiciones óptimas.

Con respecto al flujo de datos, Clarity tiene una frecuencia de medición cada 15 minutos, la cual se puede ajustar a un mínimo de 3 minutos. Para la recuperación de datos contiene un Dashboard (aplicación web), un API Restful y un OpenMap. Además, para la comunicación del dispositivo con la nube utiliza Tarjeta SIM celular global 2G/3G/4G con servicio incluido.

Por último, como utiliza panel solar, está tiene una potencia de 6W permitiendo que la batería dure por 5 años con recolección solar y 30 días sin esta. Además, sus condiciones de funcionamiento en el entorno es que esté en un rango de temperatura de -10 a 55 °C y una humedad entre 10 a 98%.

2.3.1.1. Diagrama del sensor Clarity Node-S

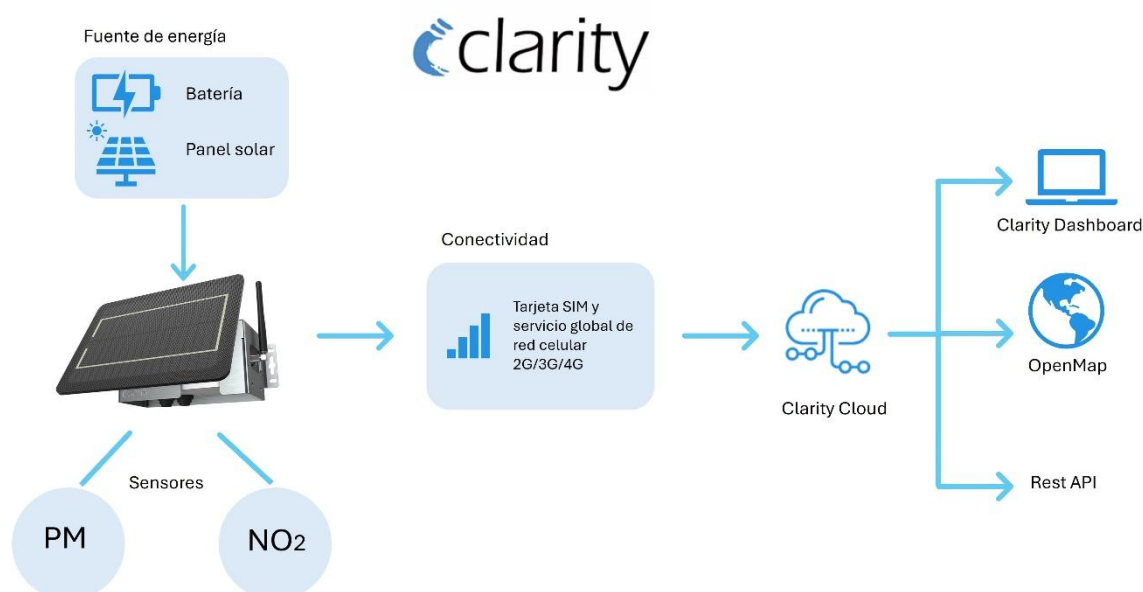


Ilustración 3: Diagrama del sensor de calidad Clarity Node-S

Se realiza un diagrama del sensor Clarity con el fin de comprender su funcionamiento, ya que es un dispositivo seleccionado por el Gobierno Regional (GORE) para el proyecto Ciclovías Inteligentes y Transporte sostenible para la Región Metropolitana y el cual será utilizado para las mediciones del plan de monitoreo. El dispositivo se alimenta mediante un panel solar para otorgar energía a la batería, como función principal tiene la medición del material particulado y el dióxido de nitrógeno, mediante la red celular se envían los datos a Clarity Cloud el cual tiene comunicación con Clarity Dashboard, OpenMap y RestAPI permitiendo al usuario visualizar los datos de las mediciones. Del Clarity Dashboard se puede observar un mapa con los dispositivos Clarity comprados por el usuario, el cual indica la medición de concentración actual donde se ubica el dispositivo y entrega de manera visual en que parte de la escala pertenece la calidad del aire. Además, se puede elegir que medición es la que se quiere saber si la del material particulado, dióxido nitrógeno o su AQI.

2.3.2. Airly

La empresa Airly^{13 14 15} cuenta con dos dispositivos de sensor de calidad de aire, uno donde solo mide material particulado y el segundo que mide material particulado más un gas, este puede ser NO, O₃, SO₂, CO y NO₂, siendo el segundo sensor el de interés. Las mediciones se realizan en un intervalo de 5 minutos, donde el MP2,5 se mide en un rango de 0-1000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] con el método de dispersión de luz, el cual según el programa de AQ-SPEC tiene una precisión de 0.83 a 0.89, mientras que el NO₂ se mide en un rango de 0-5000 [ppb] con el método electroquímico y con una precisión de 0.8. Cabe recalcar que el dispositivo cuenta con un certificado MCERTS.

El sensor resiste a temperaturas desde los -40°C a 80 °C y una humedad de 0-100%. Necesita conexión a corriente, sino también se puede optar por utilizar paneles solares de 5V. Con respecto a la accesibilidad contiene un mapa en vivo llamado map.airly.org, también una aplicación para celulares, widget, Airly API y Airly Data Platform. Para la transmisión de datos, este se puede hacer mediante GSM y de manera opcional se puede utilizar WiFi, LoRa, NB-IoT.

2.3.3. QuantAQ

El sensor de calidad del aire ModularAir de la empresa QuantAQ^{18 19} proporciona estimaciones de las concentraciones de material particulado (PM1, PM2,5, PM10) y la medición de 4 gases tales como CO, NO, NO₂ y O₃. La ficha técnica del dispositivo indica un rango de medición del material particulado de 0 a 2.000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] con tecnología de dispersión de luz, teniendo un coeficiente de determinación de 0.936 en un intervalo de 1 hora y un R² de 0.967 en un intervalo de 24 horas. Por otro lado, para el dióxido de nitrógeno se mide en un rango de 0 a 5.000 [ppb], el cual tiene un coeficiente variación del error absoluto medio de 0,48 en un intervalo de 15 minutos y 0,47 en un intervalo de 1 hora. Además, cuenta con certificados FCC cumpliendo las 15 normas de dispositivos clase A y la CE, cumpliendo con las normas técnicas.

Con respecto a la obtención de datos, se puede acceder a estos de tres formas diferentes, esto es mediante una tarjeta SD, desde la nube QuantAQ o desde la API de QuantAQ. La comunicación de los datos a la nube puede ser mediante 3G-2G o Wifi. Además, tiene una resolución de tiempo en la nube de 1 minuto.

En aspectos más generales, para el funcionamiento del dispositivo este necesita una potencia de 5V que puede ser suministrado con panel solar (es una compra adicional), resiste temperaturas desde -20 hasta 50 °C y una humedad entre 5 a 95%.

2.3.4. Bettair

Los nodos estáticos de Bettair²⁰ son múltiples sensores que pueden medir una variedad de contaminantes de manera autónoma, además de ruido ambiental y otros parámetros. Los nodos tienen integrado sensores de gases electroquímicos el cual puede medir hasta 6 gases tales como: NO₂, NO, CO, O₃, SO₂, H₂S, VOC, NH₃. Mientras que para la medición de material particulado utilizan sensores de contador óptico de partículas. No hay más información con respecto a los rangos de medición ni de la calibración de estos, tampoco de las condiciones a la que puede operar el dispositivo.

En grandes rasgos del dispositivo, este tiene una vida útil de dos años y la conectividad puede ser mediante LoraWan, Narrowband-IoT, 3G/4G y Ethernet. Y requieren alimentación externa de batería o panel solar.

Con respecto a su plataforma esta muestra los datos de cada dispositivo y también presenta mapas de calor de las zonas abarcada.

2.3.5. KunakAir

La empresa KunakAir²¹ presenta dos tipos de soluciones: Kunak Air Pro y Kunak Air Lite, la diferencia presente de estos radica en la cantidad de “cartuchos” que utiliza, donde el primero puede medir hasta 5 gases contaminantes y partículas, mientras el segundo mide 2 gases y partículas a la vez. Por lo que, estando más acorde al objetivo inicial se analiza el sensor Kunak Air Lite. Este permite la medición de material particulado 1, 2,5 y 10 mediante un contador óptico de partículas teniendo un rango desde 0 a 2.000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] para el MP2,5 con una temperatura de funcionamiento entre -10 a 50°C y un rango de humedad de 0 a 95% con una vida útil de 2 años. Con respecto a los gases a elegir se puede medir CO, CO₂, NO, NO₂, O₃, H₂S, SO₂, NH₃, COVS, CH₄ y HCl. Para el NO₂ se utiliza un sensor tipo electroquímico que mide desde un rango de 0 a 5.000 [ppb], teniendo un rango de temperatura de funcionamiento de -30 a 45 °C y un rango de humedad de 0 a 99% con una vida útil de 2 años.

KunakAir muestra en su ficha técnica evidencia con respecto a la calibración de los distintos sensores. Enfocándonos más en el material particulado y el dióxido de nitrógeno, el MP2.5 posee un R² de 0,90 con respecto a la estación de referencia, mientras que el NO₂ tiene una precisión de 0,94. Además cuenta con certificado MCERTS y según señalan, proporcionan datos precisos según la Clase 1 de la norma europea CEN/TS 17660.

Con más relación a su autonomía, este funciona constantemente las 24/7 con cargador o panel solar, con batería puede funcionar de 9 a 20 días. Consume de 0,08 a 0,55 W dependiendo su configuración. Para su comunicación este utiliza una multibanda 2G/3G/4G, Ethernet y Modbus RTU Esclavo, cuenta con una eSim integrada y soporte SIM adicional. Con respecto a su tiempo de medición, este realiza un periodo de muestreo cada 10 segundos y su periodo de envío es desde los 5 minutos.

En cuanto a su plataforma web llamada Kunak Cloud, es un software que monitoriza la calidad del aire, la cual incluye herramientas como un panel de control para visualizar los datos y revisar el estado de los dispositivos en tiempo real, un cuadro de mandos, analíticas avanzadas, origen de la contaminación, mapas de calor y recuento de partículas.

2.3.6. AQMesh

El monitor de calidad de aire exterior de AQMesh^{22 23} permite la elección de hasta 6 gases tales como NO, NO₂, O₃, CO, SO₂, H₂S y TVOC, los cuales se miden mediante sensores electroquímicos. Por otra parte, también realiza la medición de material particulados, ruido, velocidad y dirección de viento, las cuales pueden ser opcionales. El rango de medición del NO₂ como contaminante objetivo es de 0 a 4.900 [ppb] con una precisión de 0.85, mientras que el del material particulado 2,5 es de 0 a 150 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], el cual se mide mediante un contador óptico de partículas y tiene una precisión de 0.9. Además, la empresa cuenta con la certificación indicativa MCERTS. Adicionalmente, el rango de

temperatura en el que funciona el sensor es de -20 °C a 40 °C y su rango de humedad es de 15 a 95%. Por otra parte, la alimentación de batería puede ser mediante un panel solar o la red eléctrica de 9 a 24 V DC. Con respecto a su conectividad, AQMesh utiliza LTE y NB-Iot, además indica su compatibilidad con futuras tecnologías tales como 4G, 5G, 6G, etc. Por último, para su acceso a datos, la empresa dispone de tres métodos diferentes: descarga básica, aplicación web y API. Si el usuario decide la descarga básica, se realiza un intervalo de lectura de 10 minutos y la entrega de datos es semanal/mensual/programado, mientras si uno se decide por la API o la aplicación web, el intervalo de lectura es menor a 10 minutos y la entrega de datos es en tiempo real. La aplicación web permite ver lecturas gráficas o en forma de tabla y poder descargar dichos datos, además de administrar la configuración de los dispositivos.

2.3.7. Ellona WT1 Lite

Las soluciones de monitores de calidad de aire que presenta Ellona ^{24 25} son dos: WT1 Pro y WT1 Lite, la segunda presenta configuraciones más simplificadas en comparación con la primera, por lo que es más preferible utilizar el WT1 Lite por las características que esta entrega. Como característica inicial el monitor WT1 Lite mide temperatura, presión atmosférica, humedad y COV totales, además tiene la opción de integrar sensores tanto de gases, partículas, olor y ruido. Se puede implementar hasta 4 sensores de gas electroquímicos y 1 sensor óptico, por otra parte, para las partículas este presenta una variedad de sensores. Con respecto a los sensores de interés, puede medir NO₂ con un sensor tipo electroquímico en un rango de 0 a 5 [ppm], mientras que el MP2,5 mide entre 0 a 2.000 [µg/m³], con una precisión típica de +-3 [µg/m³].

Por otro lado, se tienen las especificaciones técnicas que indican que el dispositivo puede operar entre temperaturas de -30°C a 60 °C y con una humedad relativa por debajo del 100% sin condensación. Además, presenta múltiples opciones de conectividad tales como multibanda 2G/3G/4G, Wi-fi, Ethernet y LTE-M/GPRS. Su alimentación de entrada es de 12 V CC, que puede ser por medio de batería o panel solar. Con respecto a su tiempo de monitorización, este lo hace de manera continua, actualizando los datos cada 10 segundos. La plataforma EllonaSoft permite que el dispositivo proporcione sistemas de alerta en tiempo real, también mediante su API, permite acciones de corrección para optimizar la gestión ambiental. Además, recopila datos en tiempo real y realiza análisis de datos. También identifica las fuentes de contaminación mediante su mapa interactivo, permite que uno administre su red de sensores y detecta riesgos potenciales.

2.3.8. Prana Air

La empresa Prana Air ^{26 27 28} tiene una amplia gama de productos, con respecto a los sensores de calidad de aire exterior, este presenta 3 soluciones: Ambiente PM, Prana Sense y Ambiente Pro. Siendo Prana Sense el dispositivo que cumple con los requisitos iniciales, el cual mide material particulado (PM10, PM2,5 y PM1) y gases tales como: CO, CO₂, SO₂, NO, NH₃, NO₂, CH₄, O₃, H₂S y TVOC. Para los materiales particulados se utiliza la tecnología de dispersión de luz, el cual mide en un rango entre 0 a 30.000 [µg/m³] teniendo una exactitud +- 15%. Para el gas NO₂, se mide mediante un sensor electroquímico en un rango de 0 a 20 [ppm], con una exactitud +- 3%. Además, el dispositivo resiste temperaturas desde los -40 a 70 °C y una humedad relativa de 0 a 100%.

Para la conectividad se puede utilizar Wifi, GSM, LoRa y RS-485. El almacenamiento puede estar dado por una tarjeta SD o la nube con comunicación a una aplicación AQI o el Dashboard. Además, el intervalo de datos puede ser entre 30 segundos a 1 hora.

La alimentación del equipo puede ser mediante la integración de su panel solar con batería o de manera directa necesitando 30 W.

2.3.9. EkoNET

La empresa EkoNET²⁹ cuenta con un monitoreo de calidad aire, al cual lo nominan como el servicio ekoNET-Air que cuenta con un dispositivo AQ-Calidad del aire, un servidor en la nube y una aplicación web y móvil. El sensor perteneciente a este servicio es AQ10x el cual monitoriza calidad de aire y parámetros ambientales en tiempo real con una conectividad que puede ser vía GPRS/3G/4G/NB-IoT, LoRa/Sigfox, WiFi o BLE. EkoNET ofrece tres tipos de paquetes: básico, estándar y avanzado, dependiendo del seleccionado, la configuración del dispositivo irá variando. El paquete que integra el material particulado y dióxido de nitrógeno es el estándar. Además del material particulado y el gas, también mide: humedad relativa, temperatura, presión atmosférica, monóxido de carbono, ozono y dióxido de azufre. Con respecto a los rangos de medición, el sensor de dióxido de nitrógeno puede medir hasta 20 [ppm], mientras que el material particulado no hay más información más que el tamaño esférico equivalente que va desde los 0.38 a 17. El dispositivo en sí puede operar en temperaturas de -40 a 85 °C con una humedad relativa de 0 a 100% sin condensación.

2.3.10. Dispositivo USM

Como solución alternativa, se desarrolla un sensor de calidad de aire³⁴, correspondiente al Producto 5 (Gálvez y cols., 2024), el cual es un conjunto de sensores independientes que miden MP2.5, NO y NO₂, los cuales están conectados a un Single-Board-Computer (SBC), Raspberry Pi, esta almacena información localmente de los registros de las mediciones de los contaminantes en un intervalo de tiempo predefinido. Además, incluye la medición de variables meteorológicas como la temperatura y humedad. Adicionalmente, se realiza un módulo de detección de objetos viales, el cual consiste en una cámara IoT que puede ejecutar en tiempo real algoritmos de detección de objetos mediante YOLO con el fin de realizar conteo y estadísticas de los vehículos en tránsito.

Las características del prototipo incluyen un integrador de datos (SBC) que recolecta los datos de los sensores, conectividad por red móvil mediante un dispositivo BAM 3G o 4G adosado al integrador de datos, permitiendo el envío de datos a algún servidor ya sea local o de una nube para permitir almacenar y analizar la data. Y por último la alimentación de energía donde cada SBCs del dispositivo funciona con 5V AC/DC. Se consideran alternativas como paneles solares, Socket NEMA o una toma de corriente convencional. Dicha elección dependerá del lugar de instalación y las condiciones existentes.

Para la confección del sensor de calidad de aire se tienen los siguientes componentes:

1. Sensor NO: Sensor análogo electroquímico AlphaSense NO-B4, montado sobre una placa ISB-B Modelo 01 (000-0ISB-01).
2. Sensor NO₂: Sensor análogo electroquímico AlphaSense NO₂-B43F, montado sobre una placa ISB-B Modelo 02 (000-0ISB-02).

3. Sensor MP2.5: Sensor digital de dispersión lumínica PlanTower PMS7003.
4. Sensor Meteorológico: Sensor digital DHT22 para medición de Temperatura y Humedad relativa del ambiente.
5. Single-Board-Computer (SBC) sin GPU: Se seleccionó el uso de una Raspberry Pi 4 de 4GB de RAM, debido a su versatilidad y compatibilidad en el mundo IoT, además de tener prestaciones de hardware más robustas para ejecutar tareas en paralelo. Este dispositivo se alimenta por USB-C, con una fuente de 5v y 3A.
6. BAMSIM-Card USB: Para entregar conectividad mediante el uso de la red móvil chilena bajo formato prepago, una BAM USB marca Zte modelo Mf920u compatible con redes 3/4G se conecta al SBC seleccionado.

Para integrar todos los elementos del módulo, se agregaron los siguientes accesorios:

- a) Conversor Análogo Digital: Dentro los diferentes sensores se poseen señales análogas (NO, NO2) y digitales (PMS7003, DHT22). El SBC seleccionado solo posee entradas digitales, por lo tanto, el sistema debe incorporar un Conversor análogo-digital (ADC) ADS1115 de 16-bits, para que la señal análoga de ambos sensores de NOx pueda ser recibida y manejada por la SBC.
- b) Protoboard: Para poder hacer la conexión entre los sensores y la SBC seleccionada, se utilizó una Protoboard de 400 puntos, para ordenar los circuitos y tener un lugar para montar el ADC para las señales análogas

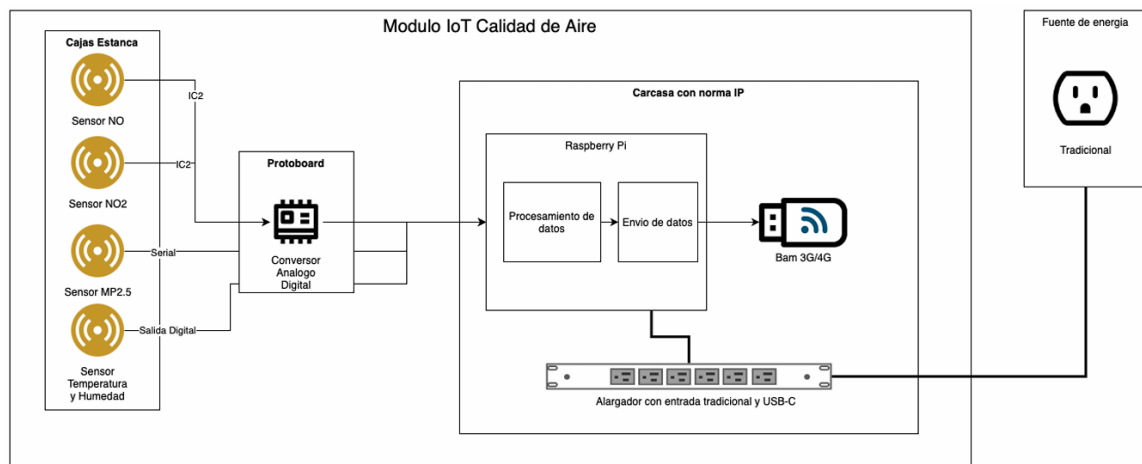


Ilustración 4: Diagrama del módulo de calidad de aire USM.

2.4. Estructura de costos

En base al informe Producto 4 (Osses y cols., 2023) se presentan las cotizaciones de las compañías que contactaron, utilizando como filtro aquellos dispositivos con una solución llave en mano que incluyese tanto los equipos instalados y conectados, como una plataforma de monitoreo donde revisar y procesar estos datos. Además, se menciona el uso que llevará a cabo los sensores dentro del proyecto de ciclovías inteligentes. También consideraron que mínimo el sensor sea capaz de medir MP1, MP2.5, MP10, O₃ y NO₂, tener carcasas IP, comunicación vía 3G/4G y medir condiciones climáticas como temperatura y humedad. Considerando lo descrito anteriormente, se cotizaron las empresas

Kunak (España), AQMesh (Reino Unido), QuantAQ y Clarity (Estados Unidos). A continuación, se presentan en una tabla los costos de adquisición más el valor de la operación del primer año (considerando la adquisición de 150 equipos). Cabe recalcar que las cotizaciones son válidas entre 30 a 60 días a contar de la emisión del informe, por lo cual, estos valores pueden variar después del plazo.³³

Tabla 10: Costos de adquisición más valores de operación del primer año para los proveedores estudiados.

Oferente	Consideraciones	Total sin IVA (CLP)
Clarity	MP2.5+NO ₂	\$1.855.000
Kunak	MP1, MP2.5, MP10, PTS y NO ₂	\$3.630.792
QuantAQ	M1, MP2.5, MP10, NO ₂ , CO, O ₃	\$4.823.333
AQMesh	NO ₂ + MP	\$5.236.250

Como se mencionó anteriormente, se desarrolló un dispositivo como solución alternativa, para ello se consideraron los costos de cada componente para tener su costo total, entre estos se tiene el costo de hardware, costo de instalación, costo de comunicaciones, costo de mantención y de factores de corrección.

- Costos de hardware: Para los sensores de gases NO_x se cotizó con la empresa Alphaense Ametek, considerando los sensores, el board y el kit de instalación. Por otro lado, para los sensores de material particulado se considera una compra realizada por AliExpress.
- Costo de instalación: Según la empresa Antü Energía, la instalación de la caja debe estar alrededor de los 20.000 CLP por equipo. Mientras, la instalación eléctrica sería de 5.000 CLP, sin considerar los materiales eléctricos.
- Costos de comunicaciones: La empresa Entel entrega tarjeta SIM gratis y los planes que entrega la empresa de comunicaciones celulares globales multibanda LTE (2G-3G-4G) van desde los 9.197 CLP (60 GB) hasta los 19.356 (280 MB) mensuales.
- Costos de mantención: La empresa AQMesh que las mantenciones deben realizarse cada 2 años de operación, con un costo de 872 USD cada una, lo que en pesos chilenos sería aproximadamente 900.000 CLP por equipo. Sin embargo, la empresa Sercoamb (Kunak) lo estima en 150.000 CLP anual. Como es un proveedor local, se considera el último valor.
- Factores de corrección: Al costo total se le aplica un factor de corrección de 1,5, ya que se consideraron 3 factores que pueden variar con el tiempo: el primero tiene relación a validación limitada de las cotizaciones, la cual va desde 30 a 60 días desde su emisión, por lo que no se puede asegurar que su precio sea constante en el tiempo. En segundo lugar, los valores varían directamente por el valor del tipo de cambio y por último se considera un margen de seguridad por imprevistos.

Tabla 11: Costos asociados al montaje de los sensores por componentes individuales.

Costos unitarios CLP sin IVA	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Sensores Nox	\$373.300	-	\$373.300	-	\$373.300
Sensor MP 2.5	\$80.000	-	\$80.000	-	\$80.000
Carcasa IP65	\$10.000	-	-	-	-
Cable y otros materiales eléctricos	\$10.000	-	-	-	-

Total Hardware	\$473.300	-	\$453.300	-	\$453.300
Instalación	\$20.000	-	-	-	-
Conexión eléctrica	\$50.000	-	-	-	-
Total Instalación	\$70.000	-	-	-	-
Comunicación celular multibanda LTE (2G-3G-4G)	\$240.000	\$240.000	\$240.000	\$240.000	\$240.000
Mantenciones (cada 2 años)	-	-	\$150.000	-	\$150.000
Total CLP sin IVA	\$783.300	\$240.000	\$843.300	\$240.000	\$843.300
Factor de corrección	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Total final	\$1.174.950	\$360.000	\$1.264.950	\$360.000	\$1.264.950
Total operación 5 años	\$4.424.850				

Además, para estar más acorde al proyecto de las ciclovías inteligentes, se calcularon los costos de las tres etapas: 50 puntos de medición, 100 puntos y 150 puntos, tanto para los dispositivos de llave en mano como para el dispositivo USM.

Tabla 12: Costo de adquisición para completar niveles 1, 2 y 3 (CLP sin IVA).

Oferente	Nivel 1 - 50 puntos	Nivel 2 - 100 puntos	Nivel 3 - 150 puntos
Clarity	\$92.750.000	\$185.500.000	\$278.250.000
Kunak	\$181.539.600	\$363.079.200	\$544.618.800
QuantAQ	\$241.166.650	\$482.333.300	\$723.499.950
AQMesh	\$261.812.500	\$523.625.000	\$785.437.500

Tabla 13: Costos del módulo USM dentro de un horizonte de evaluación de 5 años.

Costos para 3 niveles de red CLP sin IVA	1 año	5 años
Nivel 1 - 50 puntos	\$58.747.500	\$221.242.500
Nivel 2 - 100 puntos	\$117.495.000	\$442.485.000
Nivel 3 - 150 puntos	\$176.242.500	\$663.727.500

2.5. Selección de dispositivo y conclusiones

Para realizar la selección de los dispositivos que cumplen con los factores propuestos inicialmente, se realiza una tabla comparativa tomando en consideración los criterios descritos, indicando si el dispositivo cumple o no cumple (o en su defecto, no hay información de la característica presente en la página web o ficha técnica del producto), con el fin de descartar los dispositivos que no cumplan y acotar la selección. Aquellas casillas de color azul indican que se presenta cierta incertidumbre con respecto a la información entregada.

Tabla 14: Tabla comparativa de los sensores con los criterios definidos.

Sensor	Contaminante	Tipo de sensor	Calibración	Flujo de datos	Conectividad	Resistencia
Clarity	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Airly	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

QuantAQ	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Bettair	No	Sí	No	No	Sí	No
KunakAir	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
AQMesh	No	Sí	Sí	Sí	Sí	No
Ellona	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Prana Air	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
ekoNet	No	No	No	No	Sí	Sí
USM	Sí	Sí	No	Sí	Sí	N/D

De la Tabla 14 se observa que la mayoría de los dispositivos cumplen con lo planteado anteriormente, siendo Bettair, ekoNet y AQMesh los primeros en descartarse por falta de información en su página web o por no poder cumplir los requisitos de los factores de selección. Dentro de los posibles sensores para seleccionar están Clarity, Airly, QuantAQ, KunakAir, Ellona y Prana Air. A pesar de que los sensores anteriores cumplen con los requisitos, hay algunos que sobresalieron más que otros, esto es, por la cantidad de información que entrega la empresa mediante su página web. También otro criterio es por cómo es más confiable la calibración que presentan. Por lo que la selección se reduce a Clarity, Airly y KunakAir. Ahora tomando en consideración los costos que se tiene disponible, al no saberse cuánto cuesta adquirir un Airly, se determina que la mejor selección con un sensor que cumple los requisitos iniciales y al menor costo posible es Clarity.

En conclusión, el sensor Clarity logra ser un dispositivo con herramientas completas capaz de superar los criterios de selección establecidos, indicando un buen nivel de calibración con respecto a su coeficiente de determinación teniendo valores para el MP2.5 muy cercanos a 1, esto no implica que el NO₂ tenga un R² bajo, todo lo contrario, su coeficiente es muy cercano al solicitado por lo que se sigue considerando que el sensor posee una muy buena precisión con respecto a los datos entregados. Adicionalmente, los flujos de datos se adaptan muy bien al contexto chileno, ya que permite conectividades que pueden funcionar en diversas condiciones a la que puede estar sometido el dispositivo. Por otra parte, el tipo de resistencia que promete Clarity es compatible con los cambios climáticos que se desarrollan en la Región Metropolitana, indicando un buen funcionamiento de forma constante hasta la fecha de su mantenimiento. Además, al tener integrado un panel solar permite que no haya pérdidas de datos con respecto a imprevistos tales como un corte de corriente eléctrica, permitiendo que la batería pueda realizar su funcionamiento.

A pesar de haber otros dispositivos que establecían rangos de medición mayores a Clarity o incluso una mejor calibración, un factor importante fue el costo asociado que llevaría la obtención de estos, donde Clarity resulta ser por mucho, más barato que los otros sensores y pudiendo cumplir con los requisitos iniciales de manera formidable. Sin embargo, al compararse con el precio del dispositivo USM, el costo de su arquitectura resulta ser menor que el dispositivo Clarity logrando ser una opción muy viable, ya que utiliza los mismos sensores que Clarity posee, siendo el diseño del dispositivo y las herramientas que entrega una desventaja en comparación a Clarity. Aunque este no deja de ser una solución factible para la problemática de la cual está diseñada. Ya que este a diferencia de los otros sensores, cuenta con una cámara que permite el conteo vehicular, permitiendo poder analizar la relevancia del flujo vehicular con respecto a las concentraciones de contaminantes presentes en el ambiente.

3. Capítulo 3. Plan de monitoreo

Considerando que existe la red pública SINCA que ya posee redes de monitoreo integradas las cuales mide diversos contaminantes en intervalos de tiempos fijos, se realiza una metodología que permita que la propuesta de monitoreo presente pueda complementar a la red pública. Tomando en cuenta una medición constante por parte del sensor, dando resultados de los datos en tiempo real. Para poder realizar un plan de monitoreo es importante poder interpretar los datos entregados de cada contaminante siendo estos MP2,5 y NO₂ con respecto a las normas tanto chilenas como de la Organización Mundial de la Salud, las cuales se aplican en un promedio de 24 horas debido a los efectos negativos que generan ciertos contaminantes al exponerse prolongadamente. Una vez interpretadas se implementan indicadores que permitan informar el riesgo en tiempo real del estado de la calidad del aire. Para llevarlo a cabo se emplea la siguiente metodología.

3.1. Metodología para el desarrollo del plan de monitoreo

- 1) **Selección de escenarios:** Proponer diversos escenarios para la medición del sensor que permitan comprender el comportamiento de la calidad del aire con respecto al flujo vehicular presente (o la ausencia de éste).
- 2) **Análisis de datos:** Realizar gráficos de la toma de datos obtenida cada 15 minutos, obtener el promedio horario y por cada 24 horas para comparar con las normas chilenas y de la Organización Mundial de la Salud. Una vez obtenidos los gráficos, analizar el comportamiento de estos con el fin de observar la variación de los valores y las tendencias de estos a medida que pasan las horas.
- 3) **Organización de datos:** Realizar tres formatos para diversos usuarios clasificándolos como básico, intermedio y avanzado, con el fin de dar a conocer los datos en tiempo real del dispositivo.
- 4) **Indicadores:** Diseñar indicadores con escalas de colores que permitan comprender cómo interpretar cada dato entregado y la calidad del aire presente en la zona, utilizando una escala que indique parámetros como bueno, regular, alerta, preemergencia y emergencia.

3.2. Escenarios a estudiar

Para evaluar la calidad del aire en diversos contextos, se proponen tres escenarios que representen tanto las variables de flujo vehicular como el tránsito de personas en el entorno presente. El primer escenario es una zona de vivienda urbana, caracterizada por la alta densidad poblacional y un tránsito vehicular que genera una concentración significativa de contaminantes. Como segundo escenario, se plantea una zona industrial, donde el flujo vehicular es mucho más frecuente que el de viviendas urbanas y hay más variedad vehicular tales como transporte más pesado, además se debe sumar aquellas emisiones provenientes de otros procesos productivos. Por último, se incluye una zona con muy poco flujo vehicular, donde se tenga un área con mínima influencia de fuentes móviles y actividades humanas.

3.2.1. Zona de vivienda urbana

Se realiza un monitoreo de calidad de aire exterior con el dispositivo Clarity colocado dentro de un barrio residencial en Valle Lo Campino, ubicado en la comuna de Quilicura. La medición se lleva a

cabo desde un 15 de octubre del 2024 hasta un 07 de noviembre del 2024, realizando un monitoreo constante durante los días de la semana. El dispositivo se coloca a 70 centímetros del suelo y tiene una distancia de 4,2 metros con respecto a la calle. El entorno en el que se coloca el dispositivo se caracteriza por tener una arquitectura análoga a un condominio, existiendo alrededor de 50 viviendas en el micro barrio, donde la mayoría de las casas poseen en promedio de 1 a 2 autos.

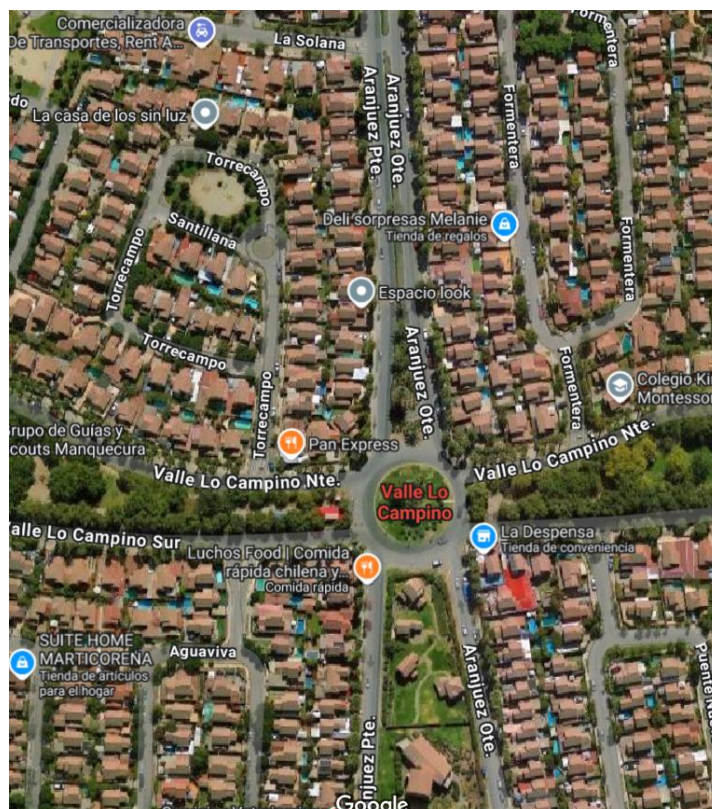


Ilustración 5: Viste satelital Valle Lo Campino.

3.2.2. Zona industrial

El montaje del dispositivo Clarity y USM se realiza en las dependencias de la Universidad Técnica Federico Santa María de la comuna San Joaquín, específicamente en las casetas de los guardias ubicado en la entrada de estacionamientos del Pinar 2. Este lugar ha sido seleccionado debido a su ubicación en una zona con características industriales, tales como empresas manufactureras, talleres mecánicos y actividades relacionadas con logística y transporte pesado. El sensor Clarity y la unidad USM se instalan en un poste cercano a la entrada de autos (véase la Ilustración 6) entre 3,5 a 3,8 metros sobre el suelo. La medición inicia un 02 de diciembre y finaliza un 22 de diciembre del 2024.



Ilustración 6: Colocación de los dispositivos en la Universidad Técnica Federico Santa María.

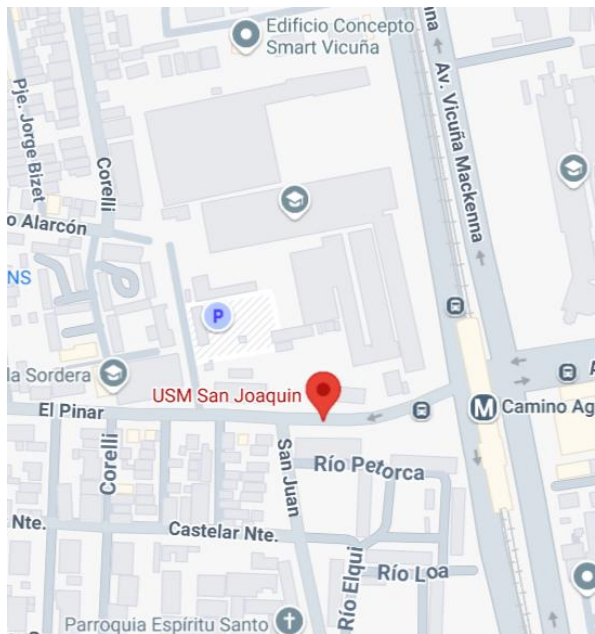


Ilustración 7: Ubicación de la Universidad Técnica Federico Santa María en el Campus San Joaquín.

3.2.3. Zona de baja densidad vehicular

La elección del lugar para el montaje del dispositivo Clarity y la unidad USM se realiza en función de la proximidad a la estación de monitoreo del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) ubicada en el Parque O'Higgins, ya que también se lleva a cabo la calibración de los dispositivos con dicha estación. La instalación de los dispositivos se efectúa en el techo de la estación SINCA, a una distancia menor de 2 metros respecto a los instrumentos normativos, y a una altura desde el suelo de entre 2.5 y 3 metros. Además, la toma de datos se realiza desde el 20/03/2024 hasta el 10/05/2024.



Ilustración 8: Colocación de dispositivos en Estación de Monitoreo del SINCA en Parque O'Higgins.

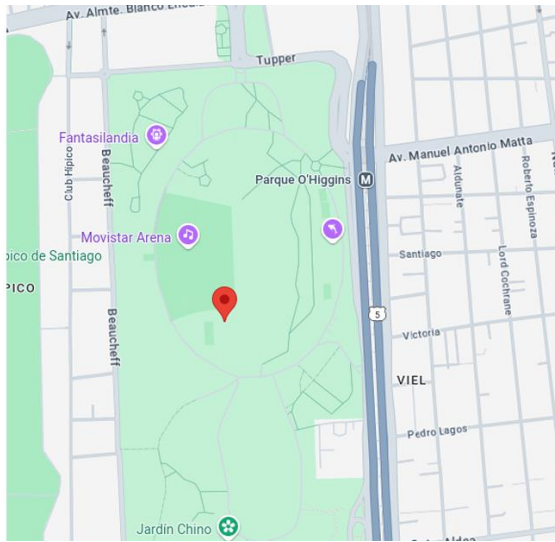


Ilustración 9: Ubicación de la Estación de Monitoreo del SINCA en Parque O'Higgins.

3.3. Análisis de datos

3.3.1. Zona de vivienda urbana

En base a la toma de datos realizada en Valle Lo Campino durante un período de 4 semanas, se analizan los gráficos obtenidos del material particulado MP2.5 y del dióxido de nitrógeno. Considerando la Semana 2 como la más representativa, que abarca desde el 21/10/2024 hasta el 27/10/2024, se presentan los gráficos correspondientes a esta semana. Para consultar los gráficos de las otras semanas, dirigirse al Anexo A.1.

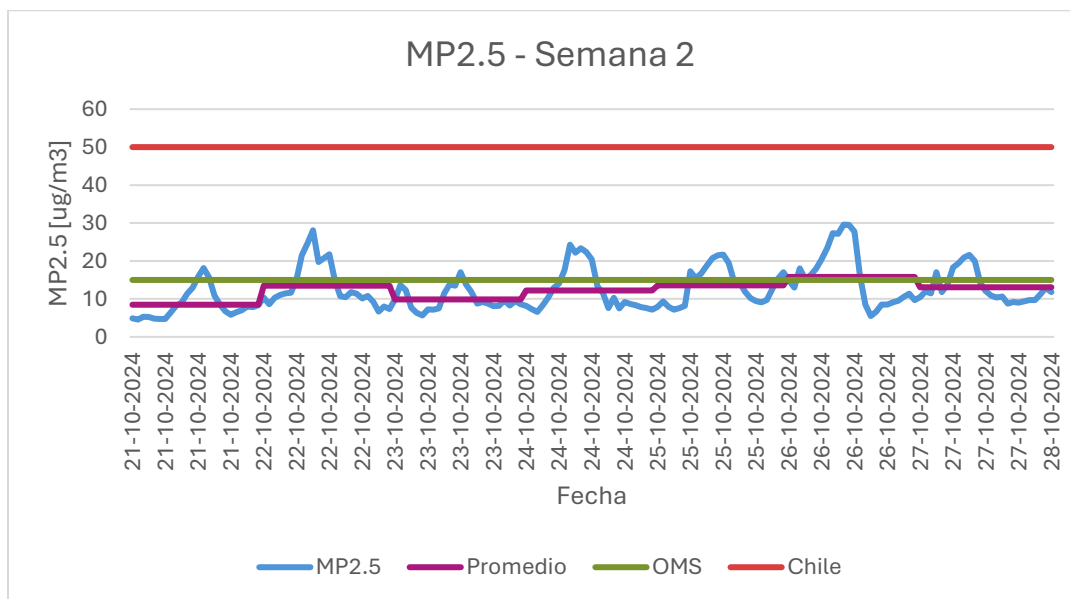


Gráfico 3: Datos por hora del MP2,5 obtenidos en la Semana 2 con su promedio diario y los límites de promedio diario de la OMS y de las normativas chilenas.

Del gráfico 3 se observa que los niveles de MP2.5 presentan picos en distintos horarios, predominando durante las horas de la tarde. Sin embargo, no se identifica un horario consistente en la ocurrencia de estos peaks. Además, se aprecia el comportamiento de los promedios diarios, el cual no muestra un patrón específico. El gráfico también muestran un comportamiento cíclico: a medida que termina la noche, los valores de MP2.5 disminuyen, alcanzando sus puntos más bajos, y luego comienzan a aumentar nuevamente hacia el mediodía.

De acuerdo con los datos reflejados en la Tabla 15, se identifican momentos específicos en los que los valores superan el promedio diario, particularmente los días lunes, martes, jueves, sábado y domingo donde los aumentos en la concentración de MP2.5 se extienden por varias horas consecutivas. Una característica recurrente es que, tras alcanzar un punto máximo, las concentraciones tienden a disminuir hacia el final del día.

También se observa que la Semana 2 presenta promedios diarios por debajo de los parámetros establecidos por la OMS y por la norma chilena exceptuando el día sábado, indicando una buena calidad de aire en la zona residencial.

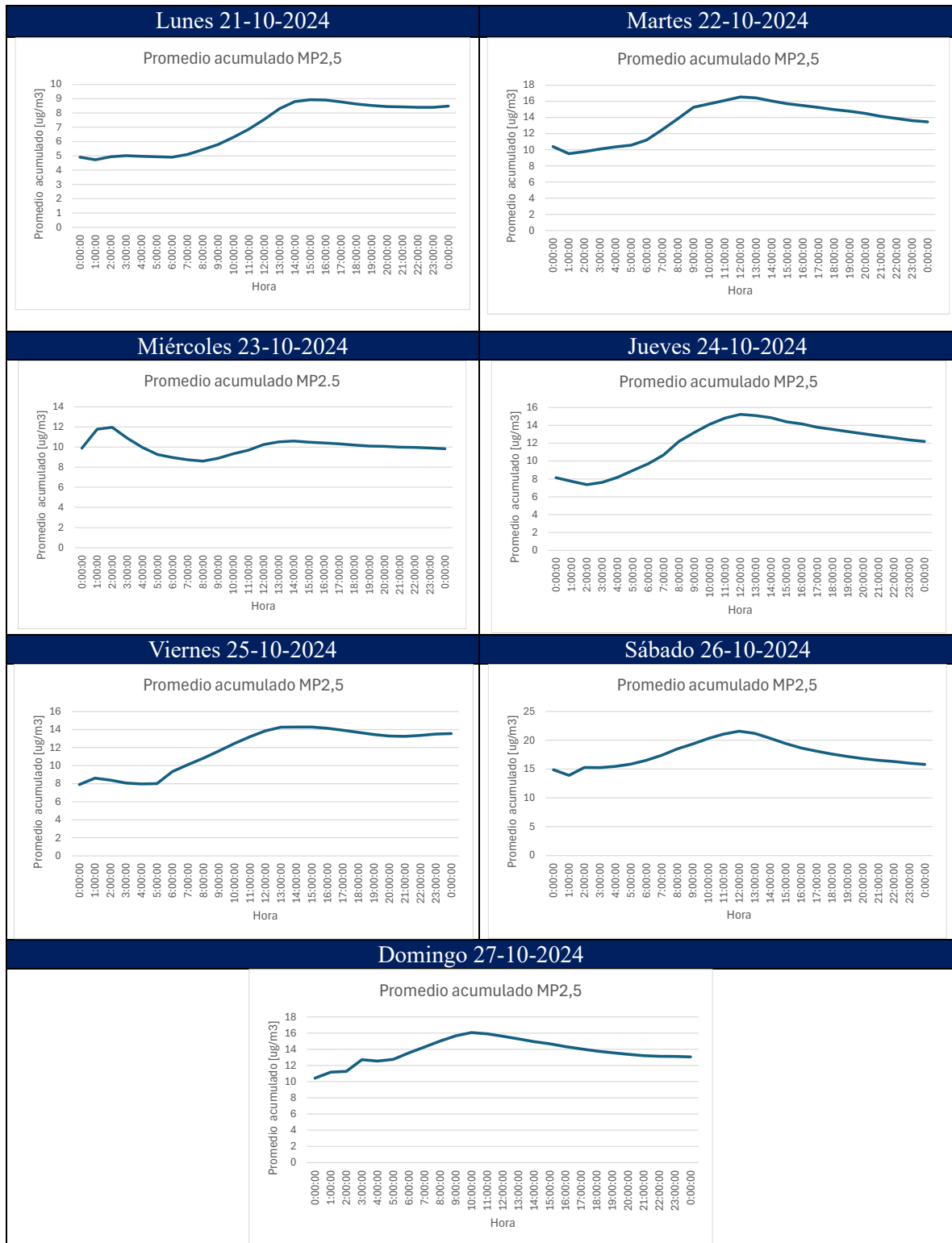
Tabla 15: Datos específicos extraídos del gráfico generado del material particulado 2.5 de la Semana 2.

MP2,5	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Datos mayores al promedio	9	8	9	9	9	11	8
Horas	09:00 a 16:00 00:00	06:00 a 13:00	00:00 a 02:00 09:00 a 14:00	05:00 a 13:00	01:00 04:00 a 06:00 11:00 a 14:00 23:00 a 0:00	02:00 04:00 a 13:00	03:00 05:00 a 11:00
Promedio [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	8,4752	13,4548	9,8332	12,1912	13,55	15,7984	13,0624

De la Tabla 16 se identifica un comportamiento bastante usual del material particulado, la tabla indica el promedio acumulado que transcurre mediante las horas, donde se observa que el MP2,5 llega a su punto más alto y luego empieza a disminuir. Se puede apreciar dicho comportamiento todos los días estudiados en la Semana 2, a excepción del miércoles donde empieza con un aumento y luego tras pasar 2 horas, el promedio empieza a disminuir para nuevamente aumentar y cumplir el comportamiento mencionado anteriormente.

Una característica en común de los gráficos estudiados de la Tabla 16 es que el peak de la curva empieza alrededor de las 12 de la tarde.

Tabla 16: Gráficos del promedio acumulado horario del MP2.5 de la Semana 2.



En cuanto a las otras semanas, también se observan picos en distintos horarios, predominando, al igual que en la Semana 2, durante las horas de la tarde. Sin embargo, al hacer una comparación por

día, no se identifica un rango de horario consistente en el inicio del aumento de las concentraciones. Tampoco los promedios diarios siguen el mismo comportamiento. Por ejemplo, en la Semana 3, los promedios diarios aumentan progresivamente hasta la mitad de la semana y luego disminuyen, mientras que en la Semana 4, el promedio diario se mantiene casi constante.

Asimismo, se observa que, al igual que en la Semana 2, las demás semanas muestran un comportamiento similar en cuanto al promedio acumulado, aunque en algunos días se generan ciertas excepciones.

En observación de las 4 semanas, se puede apreciar que tanto la Semana 2 como la Semana 4 presentan valores de promedio diario por debajo de los 15 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], lo cual dentro de los límites de la OMS es una buena calidad de aire, mientras que las Semanas 1 y 3 presentan promedios diarios que sobrepasan este valor, a pesar de esto ninguna semana logra superar la normativa chilena, ya que no se presentan ningún día con un promedio de 24 horas mayor a 50 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

Las normativas chilenas consideran un periodo de tiempo horario y uno diario para los límites de concentraciones que debe tener el dióxido de nitrógeno, por lo que es apropiado comparar dichos valores con las concentraciones obtenidas del sensor para indicar la calidad de aire presente y como se desarrolla durante el día. En el Gráfico 4 se presentan las concentraciones obtenidas del NO_2 por cada hora durante los días de la Semana 2, a simple vista, se puede observar que ningún valor llega a sobrepasar las 53,19 [ppb], por lo que dentro de la normativa de 24 horas y 1 hora las concentraciones son bajas y se considera como una buena calidad de aire. En respecto a la OMS, los promedios diarios llegan a sobrepasar los 13,29 [ppb], sin embargo, el promedio horario está por debajo de las 106,38 [ppb] que resulta ser el mismo límite que impone la norma chilena.

En comparación a las otras semanas (Véase el Anexo A.1), los promedios diarios presentes en todas las semanas, estos no logran sobrepasar la normativa chilena, solo superan la norma de la OMS obteniendo promedios por encima de los 20 [ppb]. De la misma forma, el promedio horario no se sobrepasa en ningún día, ya que ningún promedio ha logrado superar los 60 [ppb].

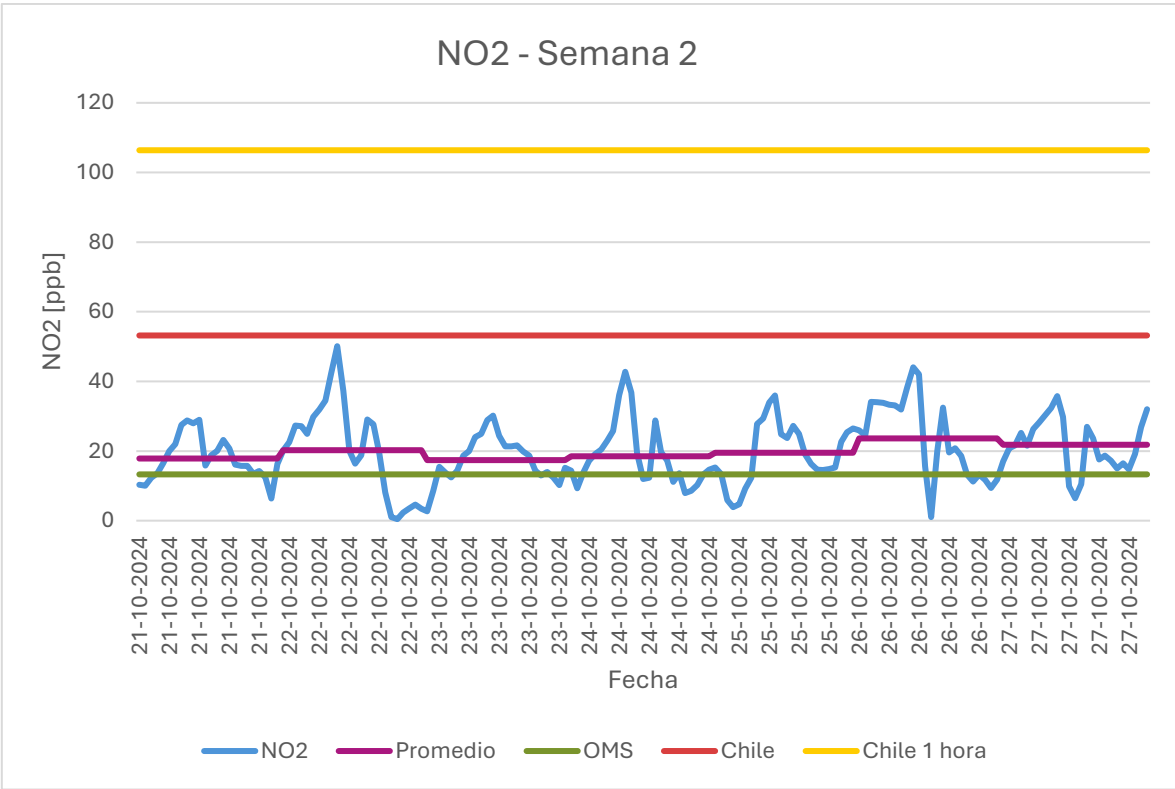


Gráfico 4: Datos por hora del NO₂ obtenidos en la Semana 2 con su promedio diario y los límites de promedio horario y diario de la OMS y de las normativas chilenas.

Como se observa en el Gráfico 4 hay valores que llegan a sobrepasar el promedio diario. En la Tabla 17 se puede apreciar que la mayoría de las concentraciones que sobrepasan el promedio diario ocurre entre las 05 de la mañana hasta las 10 de la mañana. En relación con las otras semanas, no hay un horario tan establecido con respecto a datos mayores al promedio, se puede decir en general, que estos superan el promedio entre las 00:00 hasta las 14:00 p.m. Con respecto al comportamiento del promedio tanto para la Semana 2 como las otras semanas, no se logra percibir algún patrón de disminución a través de los días, donde, por ejemplo, el promedio sea menor el fin de semana. Sin embargo, se observa que el promedio diario no logra sobrepasar los 30 [ppb], ni ser menor a 17 [ppb].

Tabla 17: Datos específicos extraídos del gráfico generado del dióxido de nitrógeno de la Semana 2.

NO ₂	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Datos mayores al promedio	11	12	12	10	13	12	11
Horas	05:00 a 10:00 12:00 a 15:00 00:00	01:00 a 10:00 14:00 a 15:00	06:00 a 17:00	04:00 a 11:00 14:00 a 15:00	01:00 a 05:00 07:00 a 16:00 23:00 a 00:00	00:00 a 10:00 14:00	03:00 05:00 a 10:00 14:00 a 15:00

							23:00 a 00:00
Promedio [ppb]	17,890	20,238	17,39	18,513	19,498	23,625	21,757

Es conveniente además analizar el cambio de concentraciones que ocurren dentro de una hora y observar la tendencia de estas. En el Gráfico 5 se presentan las mediciones que realizó el sensor cada 15 minutos aproximadamente y con apoyo del Gráfico 6 se observa las variaciones del NO₂ en el transcurso de los días. Hay que considerar que la máxima mediciones que puede realizar el sensor dentro de una hora son 4 y la mínima que ha realizado han sido 3.

A partir del Gráfico 6 se observa que las variaciones del NO₂ en su mayoría se realiza en un rango de -5 a 5 [ppb], no afectando mayormente al promedio que se obtiene después de pasar una hora. De todas formas, existen otras variaciones que logran sobrepasar las 10 [ppb], mostrándose por lo menos en 14 ocasiones, la cual si genera un peso en el promedio horario final a estudiar. Si bien es variado el momento en el que se genera estas altas variaciones, el rango de tiempo en el que suele ocurrir es desde las 11 de la mañana hasta 14 de la tarde.

De las semanas 1, 3 y 4 las variaciones ocurren en su mayoría entre los -4 a 4 [ppb], siendo el -1,1,2 y -2 los que tienen una mayor frecuencia de ocurrencia en comparación a los demás. Aquellas variaciones que son mayores a 10, no frecuentan demasiado, aparecen máximo en unas 9 ocasiones. El rango en el que se genera las altas variaciones es muy grande, ya que no ocurren en horas específicas, aparecen tanto en la mañana como en la tarde.

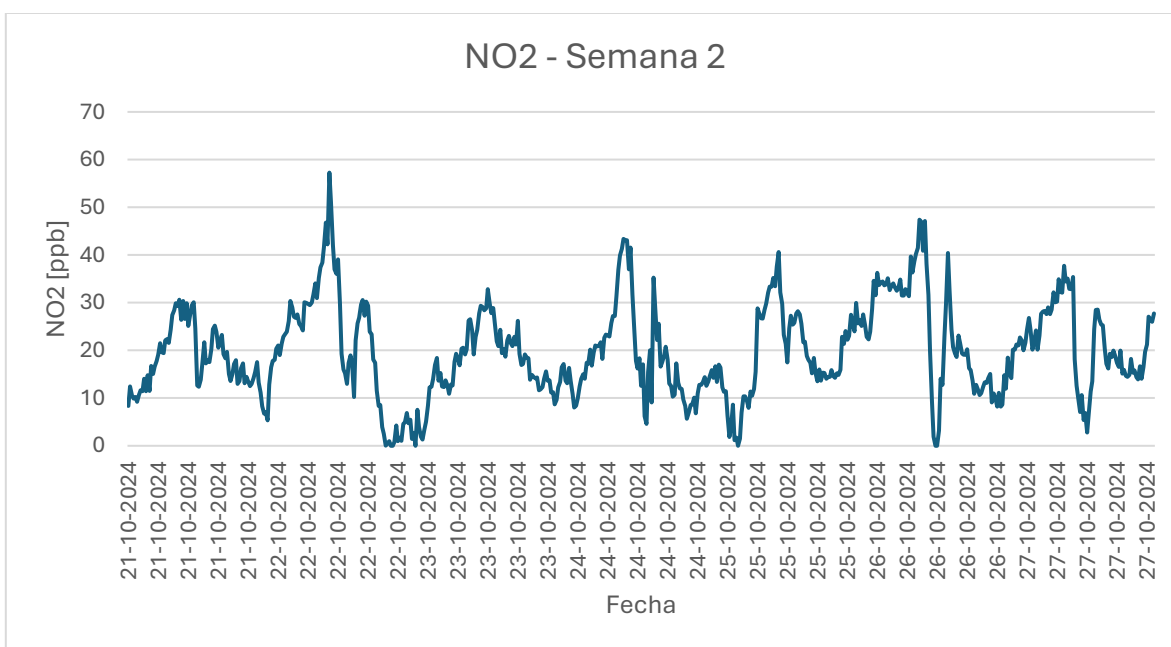


Gráfico 5: Mediciones del NO₂ cada 15 minutos de la Semana 2.

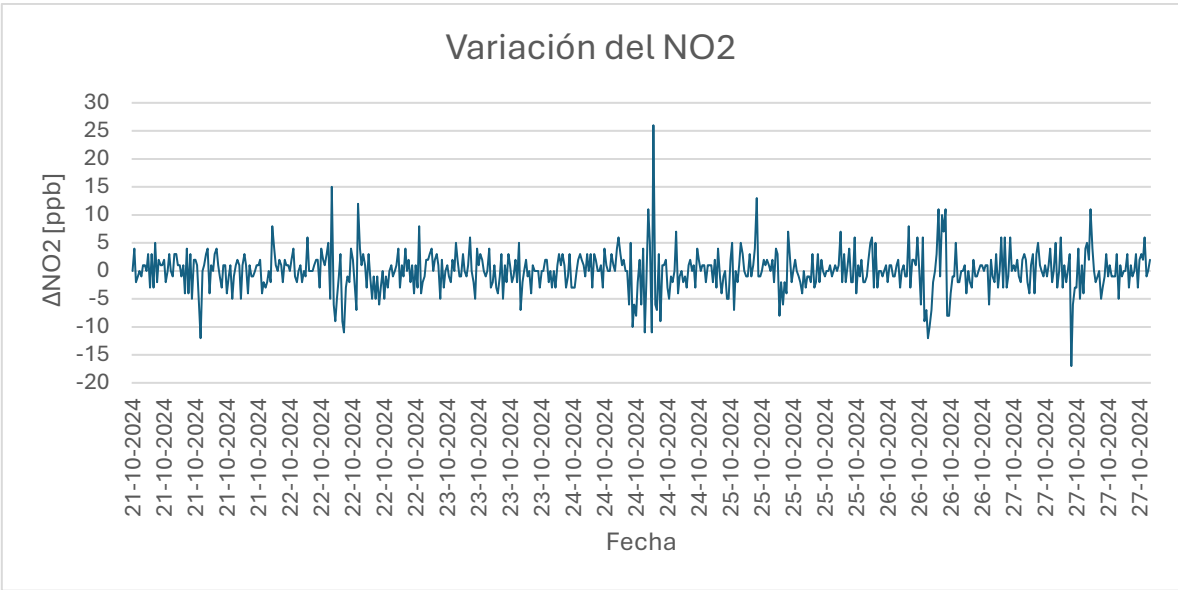
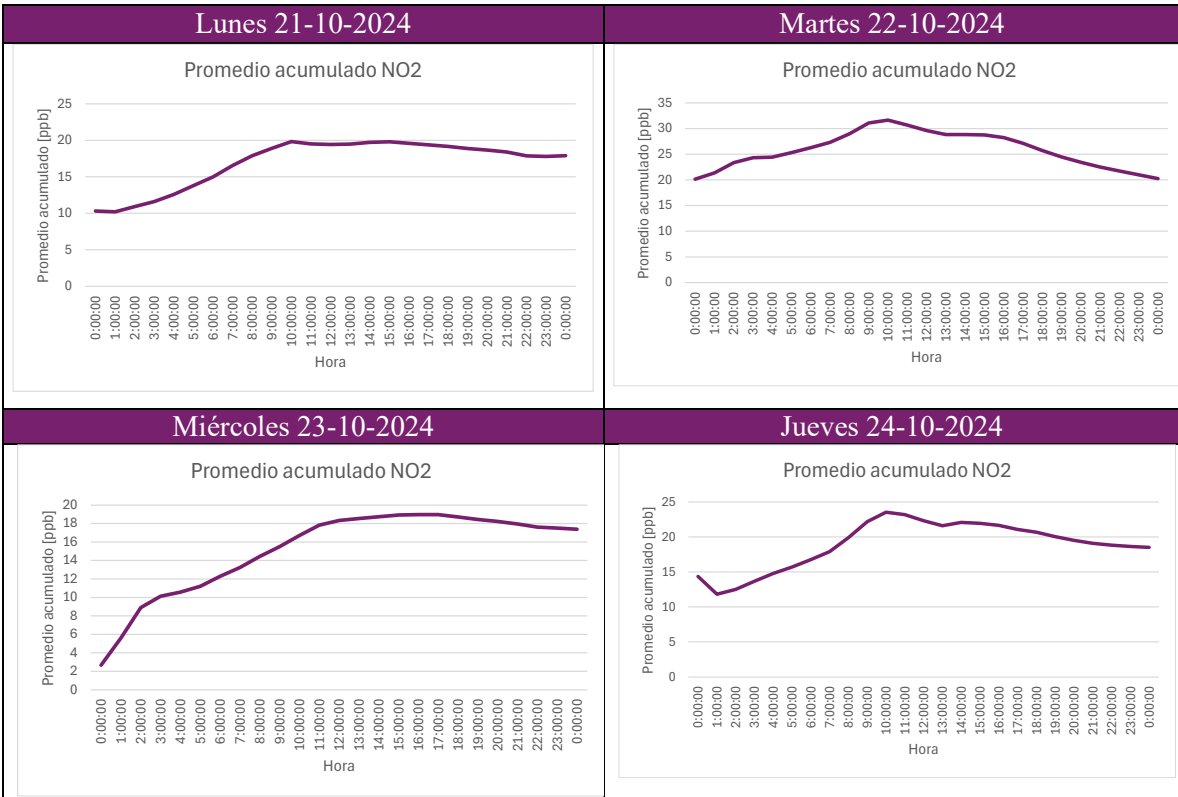
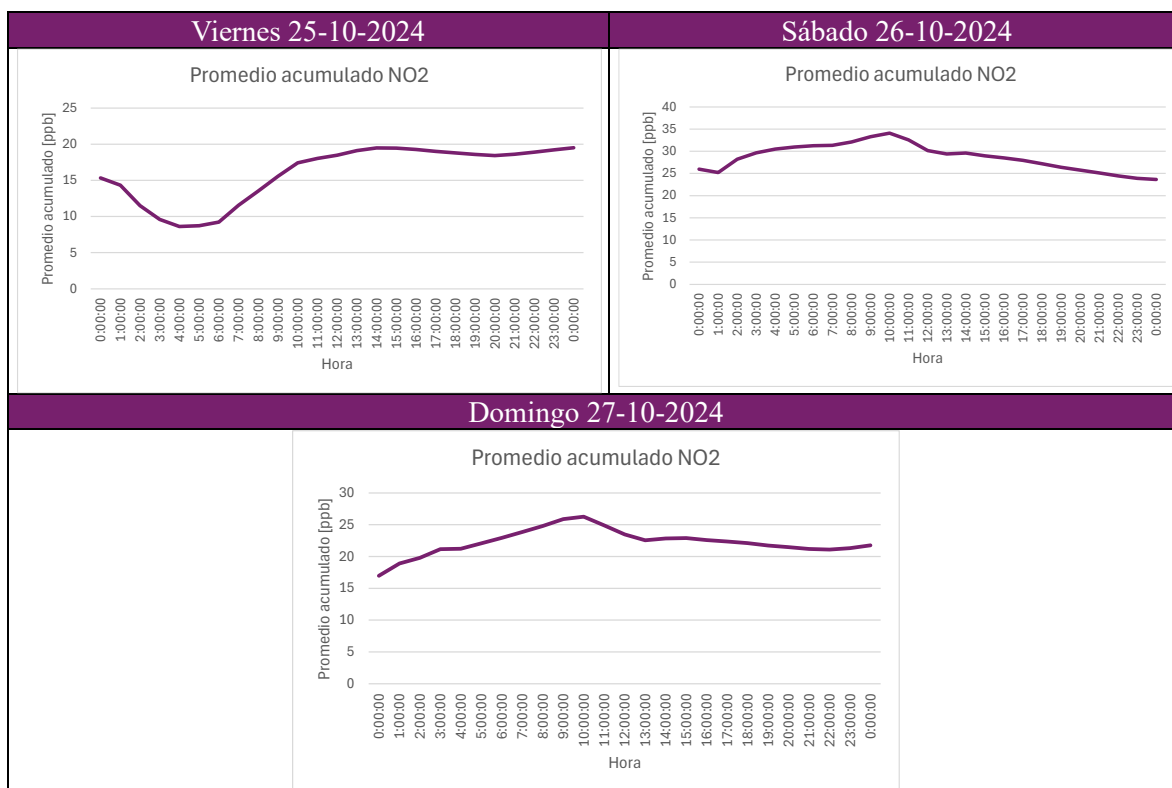


Gráfico 6: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO₂ en la Semana 2.

Es interesante observar que el NO₂ presenta un comportamiento similar al MP2,5 al calcular su promedio acumulado, en la Tabla 18, se presentan las curvas de comportamiento del NO₂ mediante las horas, logrando llegar a su peak alrededor de las 11 de la mañana, para luego disminuir el promedio. Lo mismo ocurre en las otras semanas, donde el promedio acumulado llega a su máximo valor aproximadamente entre las 10 y 11 de la mañana.

Tabla 18: Gráficos del promedio acumulado horario del NO₂ de la Semana 2.





3.3.2. Conclusión de los contaminantes de la vivienda urbana

En vista de todo lo mencionado anteriormente, se concluye que el material particulado 2.5 en zonas donde concurre una cantidad baja de vehículos, obtiene promedios diarios por debajo de los 50 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ implicando que la calidad de aire presente en la zona es buena y no llega a afectar el estado de salud de los residentes. Además, si bien no hay horarios consistentes a la hora de ver el aumento del MP2.5, este en lo general aumenta en la tarde y logra reducirse en las noches. Esto puede ser debido al horario de trabajo de los residentes, donde la mayoría sale en sus vehículos alrededor de las 7 u 8 de la mañana y luego vuelve en la tarde. Tomar en cuenta que la zona de residencia tiene muchas casas en su alrededor lo que lo hace más cerrado y generando que las partículas queden suspendidas en el aire. Se observa también que la mayoría del promedio acumulado del MP2.5 tiene un comportamiento polinomial de grado 2, esto puede permitir predecir cuanto sería el promedio máximo que se puede esperar del MP2.5 en estas zonas y contemplar desde antes la calidad de aire a la cual va a estar sometido el ambiente, esto sí, que no se presente condiciones externas que pueda alterar el comportamiento del MP2.5.

En relación con el NO₂, el mayor promedio horario que logró alcanzar durante las 4 semanas es de 53 [ppb], estando dentro de las normas establecidas. Se observa también que las mayores variaciones que se obtiene al medir cada 15 minutos son de -1 a 1 [ppb], esto indica que no hay mayores cambios en el NO₂, incluso aquellos valores que varían más de 10 [ppb] a los 15 minutos bajan, no generando mayor cambio en el promedio horario. Aquellos promedios horarios altos que se detectan se generan alrededor de las 07:00 a 11:00 de la mañana, la cual estaría relacionada con la salida de vehículos del lugar residencial. Después de estas horas el NO₂ tiende a disminuir por lo que ayuda a reducir el promedio diario. Se puede concluir de la zona que esta presenta una buena calidad de aire tanto para MP2.5 como para NO₂, teniendo bajos promedios que respetan la norma establecida chilena.

3.3.3. Zona industrial

Entre el periodo 02/12/2024 hasta el 08/12/2024 correspondiente a la primera semana de la toma de muestra de datos en la zona industrial, se visualiza en el Gráfico 7 que el material particulado presenta una concentración baja a lo largo de los días hasta llegar al 07 de diciembre, donde se observa un aumento abrupto del MP2.5 llegando a más de 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, luego este mismo disminuye después de unas horas en el mismo día y la concentración vuelve a estar dentro del rango de los valores que se presentaron durante la semana.

Dentro de la Semana 1, los promedios diarios del material particulado están por debajo de la normativa de la OMS, a excepción del miércoles y sábado, sin embargo, estos siguen estando por debajo de la normativa chilena, cumpliendo así, un aire con buena calidad.

Analizando también la Semana 2 presente en el Anexo A.2, las concentraciones son bastantes parecidas a la de la semana 1, teniendo un comportamiento similar, donde el promedio diario está por debajo de los 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Dentro de esta semana, no se observa ninguna anomalía a diferencia de la Semana 1, siendo más consistente los valores de material particulado.

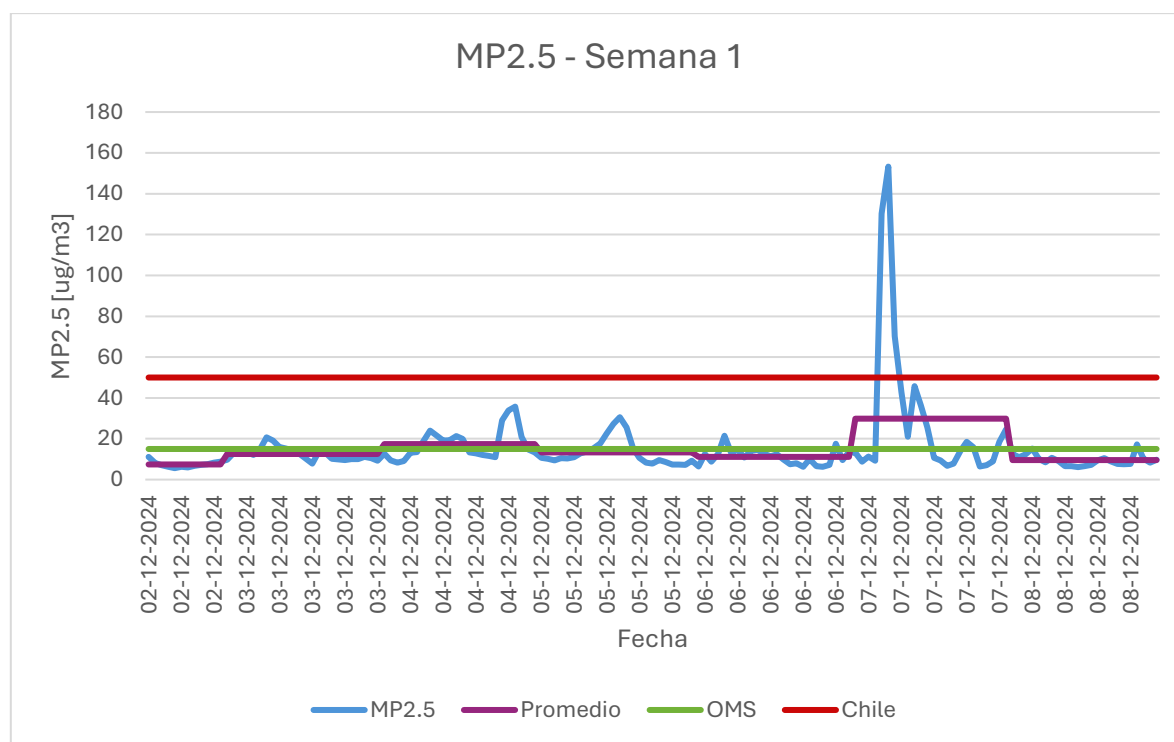


Gráfico 7: Datos por hora del MP2,5 obtenidos en la Semana 1 con su promedio diario y los límites de promedio diario de la OMS y de las normativas chilenas.

De la Tabla 19, la mayoría de los datos que son mayores al promedio en la Semana 1 se presentan durante las horas de la mañana, entre aproximadamente las 05 de la mañana hasta las 12 de la tarde. Mientras que en la semana 2, está en un rango entre las 01 de la mañana hasta las 11 de la mañana.

Tabla 19: Datos específicos extraídos del gráfico generado del material particulado 2.5 de la Semana 1.

MP2,5	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Datos mayores al promedio	5	12	11	8	12	5	10
Horas	12:00 a 13:00 21:00 a 23:00	01:00 a 03:00 05:00 a 11:00 14:00 a 15:00	06:00 a 12:00 18:00 a 21:00	07:00 a 14:00	01:00 03:00 a 06:00 08:00 a 12:00 21:00 a 23:00	04:00 a 07:00 09:00 a 10:00	00:00 a 04:00 06:00 a 14:00 19:00 a 20:00 22:00
Promedio [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	7,422	12,537	17,424	13,313	11,160	29,845	9,583

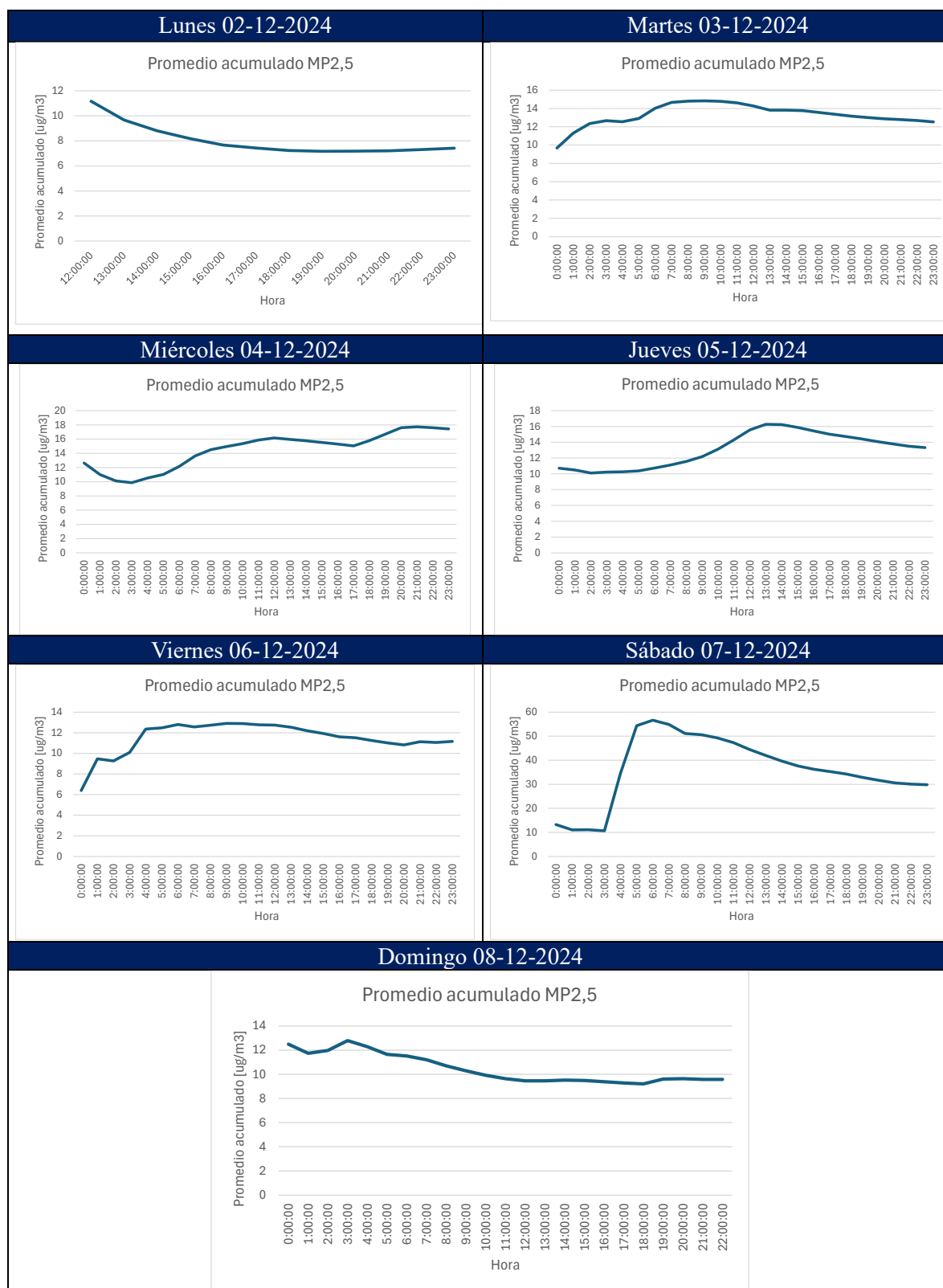
Los promedios acumulados de la Tabla 20, representan un comportamiento similar en el aumento de la curva al inicio del día hasta llegar a un valor máximo para luego empezar a disminuir. Cabe recalcar que aquellos días donde el promedio es por debajo a 10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], el promedio acumulado empieza a disminuir al pasar las horas hasta llegar a su promedio diario. Se observa además que el miércoles la curva empieza aumentando y luego decrece para nuevamente aumentar y decrecer llegando a su promedio después de 24 horas.

De los gráficos no se puede observar una hora definida donde el promedio acumulado llegue a su peak máximo, es bastante variado, ya que algunos empiezan en la tarde y otros empiezan en la madrugada.

Con respecto a los gráficos diarios de la Semana 2, se sigue respetando el comportamiento de una curva que aumenta hasta su mayor peak y luego disminuye. Se observa que el jueves tiene un promedio acumulado que va disminuyendo mediante las horas, este también cumple con tener un promedio diario menor a 10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], sin embargo, el sábado también presenta una curva similar y este logra tener un promedio diario cerca de 12 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], por lo que, tener un promedio menor a 10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] no excluye a los otros promedios de poder tener un comportamiento similar a estos.

En la Semana 2 en particular, se observa que la mayoría que los días logran obtener un promedio acumulado máximo entre las 10 a las 11 de la mañana.

Tabla 20: Gráficos del promedio acumulado horario del MP2.5 de la Semana 1.



En la Semana 1, el dióxido de nitrógeno se muestra de manera casi constante en el Grafico 8 con respecto a su promedio diario, manteniendo un valor aproximado de 29 [ppb], indicando una buena calidad de aire con respecto a la norma chilena tanto para las 24 horas como para 1 hora, no así para los límites de la OMS, llegando a superar los 13,29 [ppb]. Con respecto a la curva que se desarrolla durante los días no hay un patrón tan evidente, se observa que llega a aumentar hasta aproximadamente los 40 [ppb] y luego empieza a disminuir alrededor de los 20 [ppb].

La semana 2 (Véase en el Anexo A.2) comparte un comportamiento similar a la primera semana, donde el promedio horario máximo que llega a través de los días es aproximadamente 40 [ppb]. En relación con los promedios diarios, no se muestra mucha variación, estos son bastantes cercanos entre sí, teniendo promedios alrededor de 28 [ppb]. Comparando el promedio diario con las normas chilenas decretadas, se observa que no superan la normativa horaria ni la normativa diaria, quedando dentro de la zona de buena calidad de aire. Mientras que, en la OMS, su promedio diario si ha sido superado, pero el promedio horario está dentro de su límite.

De la Tabla 21, las concentraciones que logran sobrepasar al promedio diario en su mayoría se generan desde las 00:00 hasta las 09:00 a.m aproximadamente. Por otra parte, en la Semana 2, los datos superan al promedio alrededor de las 00:00 hasta las 07:00 a.m y luego en la noche entre las 22:00 y las 23:00 p.m. En ambas semanas no se muestra alguna disminución del promedio en relación con el día presente, ya que los resultados son bastantes parejos entre los días.

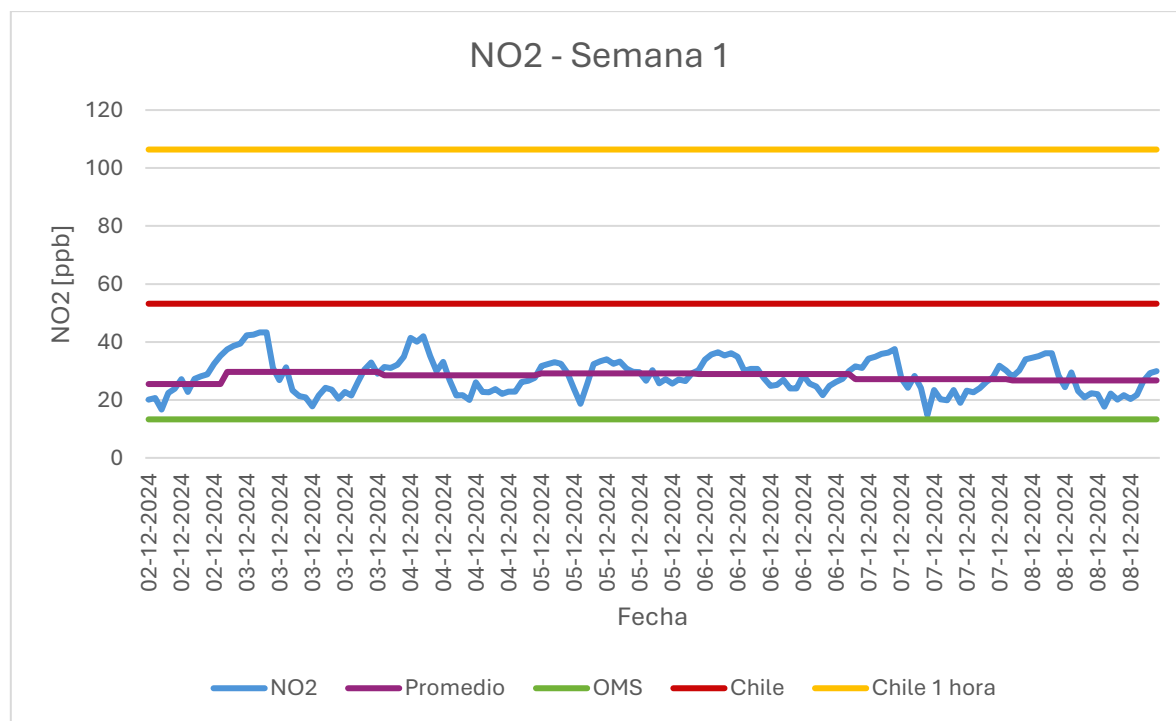


Gráfico 8: Datos por hora del NO₂ obtenidos en la Semana 1 con su promedio diario y los límites de promedio horario y diario de la OMS y de las normativas chilenas.

Tabla 21: Datos específicos extraídos del gráfico generado del dióxido de nitrógeno de la Semana 1.

NO₂	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Datos mayores al promedio	6	11	10	14	11	12	11
Horas	17:00 19:00 a 23:00	00:00 a 07:00 09:00 21:00 a 22:00	00:00 a 09:00	00:00 a 04:00 08:00 a 15:00 17:00	00:00 a 09:00 23:00	00:00 a 07:00 09:00 21:00 a 23:00	00:00 a 07:00 09:00 21:00 a 22:00
Promedio [ppb]	25,482	29,663	28,514	29,183	28,954	27,158	26,698

A partir de las mediciones realizadas cada 15 minutos se realiza el Gráfico 9, observando que dentro de este periodo los valores del NO₂ pueden llegar incluso hasta 45 [ppb]. La variación del dióxido de nitrógeno se ve plasmada en el Gráfico 10, indicando que los datos en su mayoría varían desde -3 hasta 3 [ppb], un rango considerablemente pequeño que permite predecir el rango en el que se va a producir el promedio horario del NO₂, no creando tanta variación. Mientras que los datos que obtuvieron una variación mayor a 10 fueron bastante pocos, se diría que aproximadamente hubo 5 datos que presentaron dicha variación, siendo la variación más alta de -18 [ppb].

Del Gráfico 35 (Véase Anexo A.2) perteneciente a la semana 2, al igual que en la primera semana se puede observar que el mayor valor que llega el NO₂ es hasta los 45 [ppb]. En apoyo con el Gráfico 36 se puede detectar el rango de las variaciones del gas, donde la mayoría de los datos tienen una variación entre -4 a 4 [ppb], donde el valor -1 y 1 son los que poseen una mayor frecuencia, reflejando que el promedio dentro de una hora no tiene tanta variación. Además, aquellas variaciones que son mayores a 10 ocurren aproximadamente 17 veces, llegando a ser solo un 4% del total de variaciones de la semana, con una variación máxima de -18 [ppb].

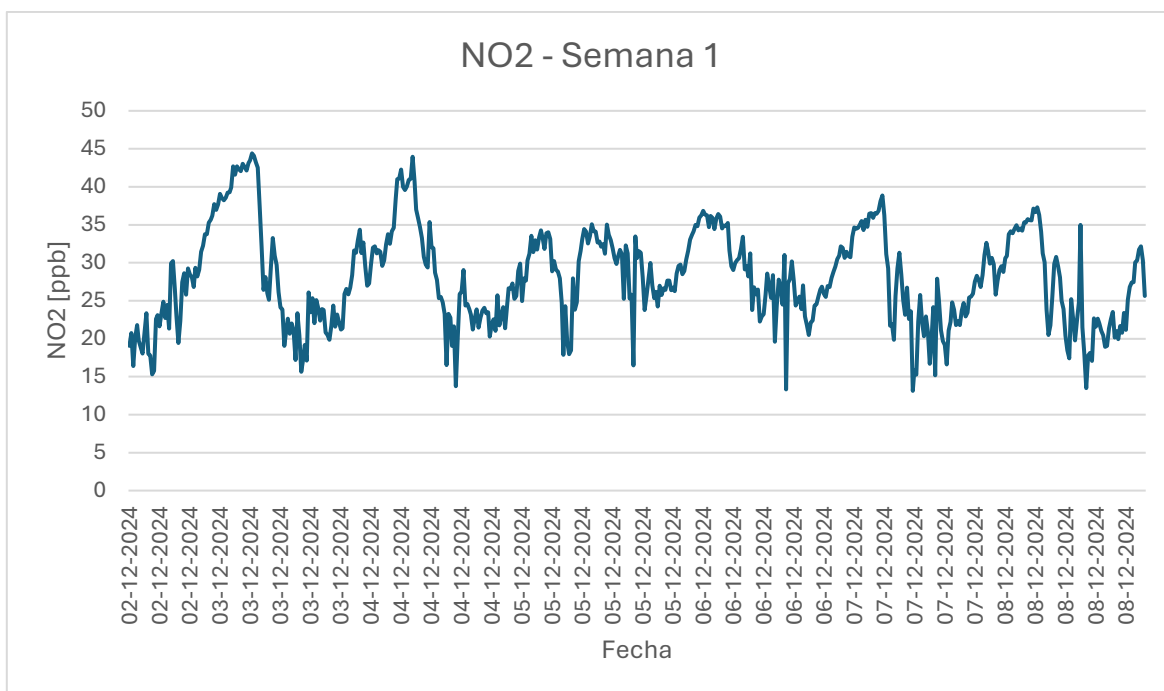


Gráfico 9: Mediciones del NO_2 cada 15 minutos de la Semana 1.

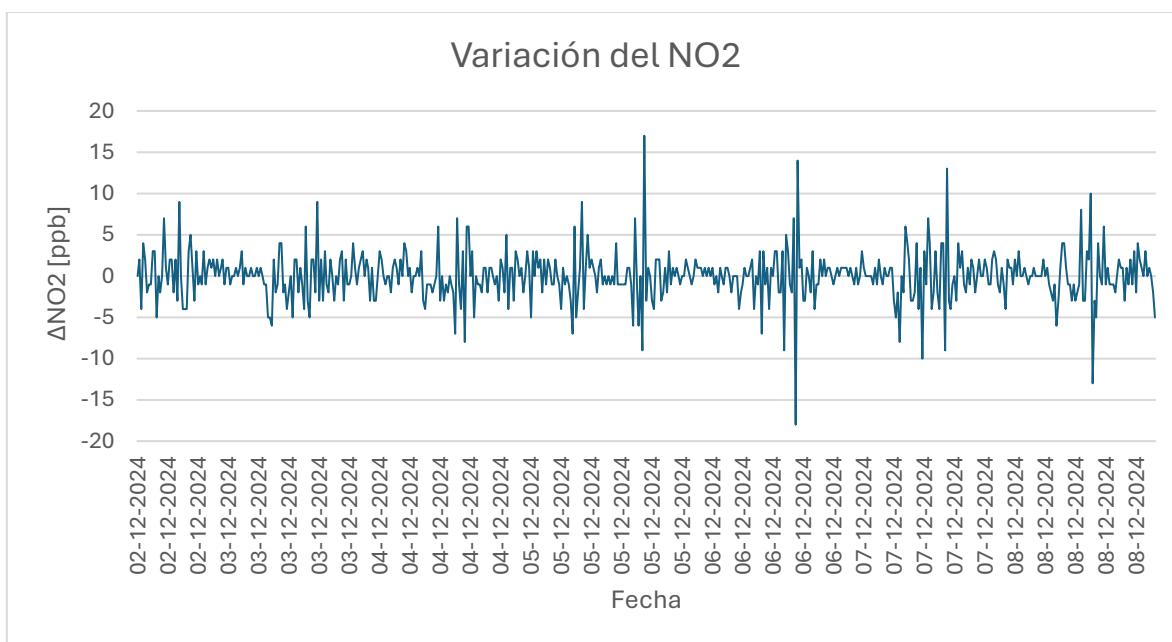
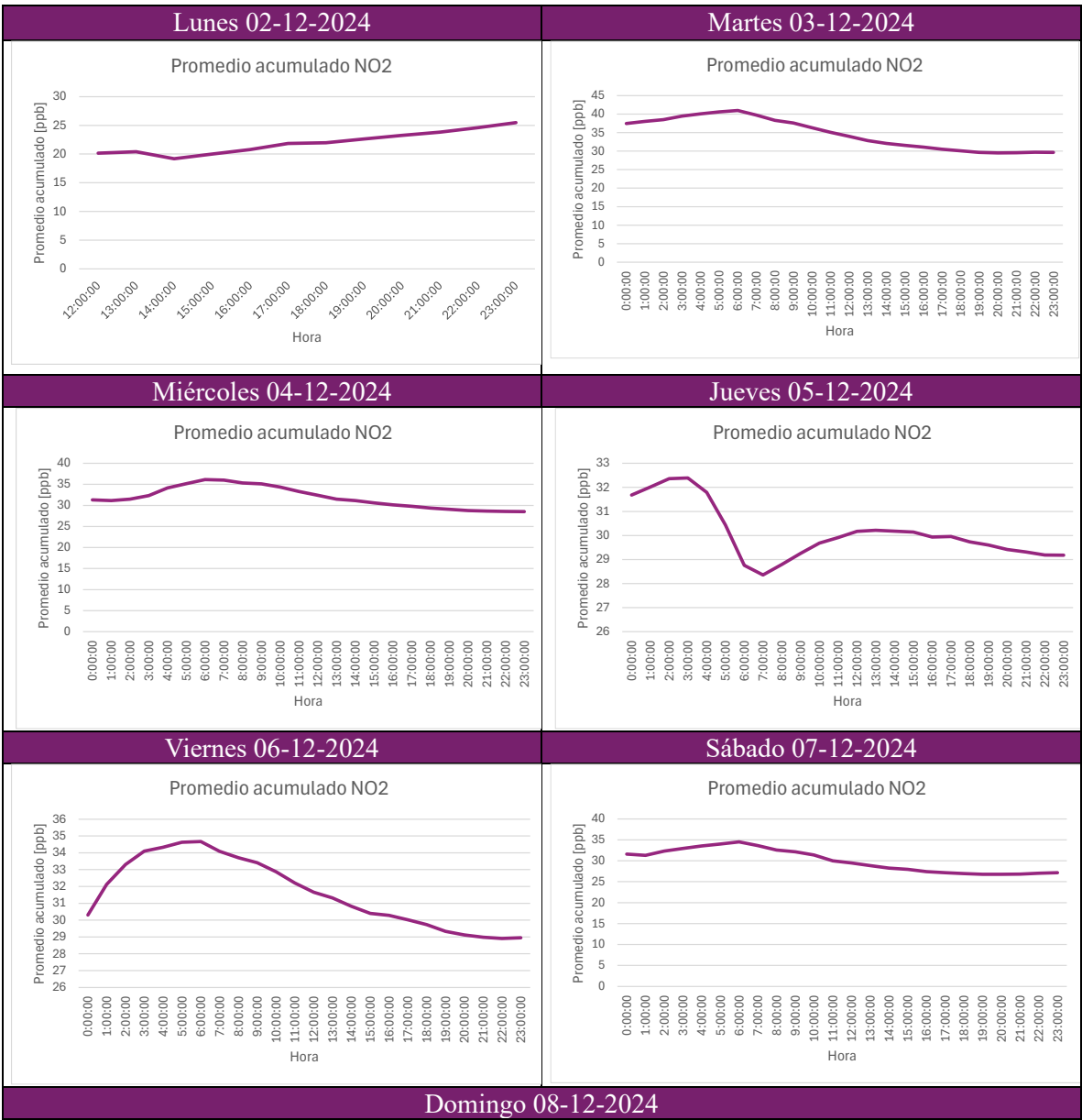


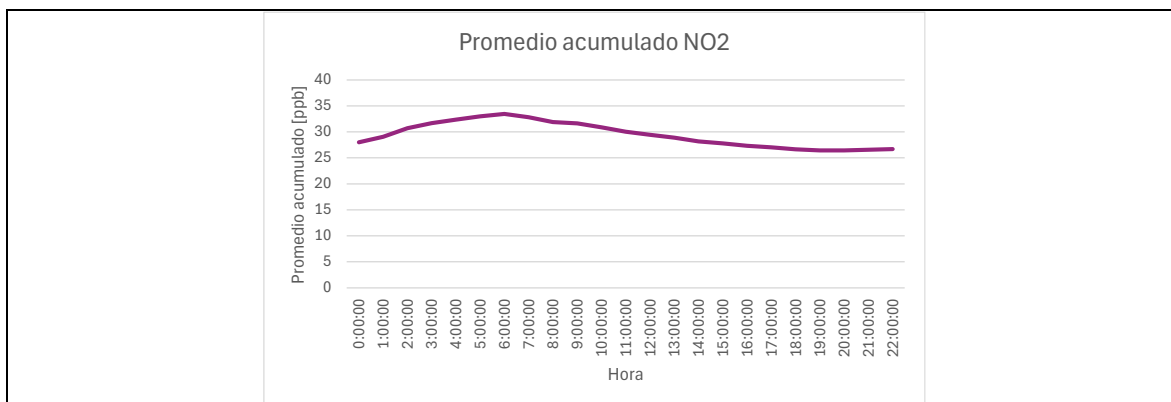
Gráfico 10: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO_2 en la Semana 1.

En la Semana 1 se pueden ver casos particulares de la forma de la curva de los promedios acumulados de la Tabla 22, ya que, si se observa los gráficos de la Semana 2, tienen un comportamiento casi idéntico, donde la curva aumenta hasta las 06:00 a.m aproximadamente y luego empieza a descender hasta llegar a su promedio diario. De la misma forma ocurre el martes 03/12/24, miércoles 04/12/24, viernes 06/12/24, sábado 07/12/24 y domingo 08/12/24 correspondientes a la primera semana. Mientras se observa comportamientos fuera de lo esperado, tales como el lunes 02/12/24 donde la

curva empieza a ascender hasta llegar a su promedio diario y el jueves 05/12/24 donde se crearon dos curvas consecutivas.

Tabla 22: Gráficos del promedio acumulado horario del NO₂ de la Semana 1.





3.3.4. Conclusión de la zona industrial

Con respecto a lo que se esperaba de la zona industrial, es decir, que presentara altos niveles de MP2.5 como de NO₂. No fue así el caso, empezando por el material particulado, este presentó durante las 2 semanas promedios diarios más bajos de lo que se esperaría, siendo un muy buen resultado para la calidad de aire presente. Los valores no presentaban algún patrón en específico, ya que, al ser una zona muy cercana a la calle, es muy variable la cantidad de vehículos que pueden transitar por ahí, aunque se puede observar, por ejemplo, en el caso del promedio acumulado que el promedio aumenta desde la madrugada. Con relación al comportamiento que presenta el promedio acumulado, se observa que tiene la intención de realizar un comportamiento polinomial de grado 2, aunque haya excepciones que generan un compartimiento lineal con pendiente negativa, sin embargo, si se utilizará la predicción con un modelo polinomial se obtendría un valor de promedio máximo al que tendría el día, siendo lo más probable, que su promedio este dentro de los límites de la normativa chilena.

Del NO₂ se observa que el comportamiento de su promedio diario es casi constante resultando aproximadamente de 29 [ppb]. Además, este no presenta mayores variaciones de medición cada 15 minutos siendo el [-1 a 1] la diferencia con más ocurrencia. Por otra parte, el mayor valor que logra alcanzar el NO₂ en 15 minutos es de 45 [ppb], siendo un valor que no logra que el promedio horario llegue a más 106 [ppb]. Esto indica un buen control del NO₂ por las calles y se puede concluir que la zona industrial es un lugar con buena calidad de aire para la salud de los transeúntes.

3.3.5. Zona de baja densidad vehicular

En la toma de datos de material particulado y dióxido de nitrógeno en el Parque O'Higgins, se utilizan tres dispositivos: SINCA, Clarity y el prototipo USM. Para comparar las mediciones, se elaboran gráficos que abarcan un periodo de cuatro semanas, desde el 20 de marzo de 2024 hasta el 14 de abril de 2024.

Se presenta la Semana 4, como la semana representativa para su análisis, para observar los gráficos correspondientes a las demás semanas se debe dirigir al Anexo A.3.

La Semana 4 tiene su inicio desde un 08 de abril de 2024 hasta el 14 de abril de 2024, en el Gráfico 11, se presencia la concentración de MP2.5 de los distintos dispositivos, siendo el SINCA el que presenta menores concentraciones en comparación a los otros dispositivos, en donde su valor más alto corresponde aproximadamente a 80 [µg/m³]. El sensor Clarity indica concentraciones mayores que llegan a sobrepasar los 160 [µg/m³], dicho valores llaman la atención al ser muy altos, ya que como supuesto se espera que una zona donde es poco el flujo vehicular tenga una mejor calidad de

aire. Por otra parte, se tiene el dispositivo USM que llega a estar entre los valores de Clarity y del SINCA, siendo el mayor valor de su muestra cerca de 110 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$.

Observar que, en las otras semanas, el sensor Clarity sigue liderando en la medición de concentraciones altas, donde en la primera semana su mayor medición es de 90 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$, mientras que la segunda semana llega a sobrepasar los 100 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$, y en la tercera semana tiene valor por sobre de 80 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$. Luego aparece el dispositivo USM, con valores entre medio del Clarity y el SINCA, donde la primera semana su concentración más alta es de aproximadamente 43 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$, en la segunda llega a ser 54 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ y en la tercera semana está cerca de 43 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$. Por último, el sistema SINCA, en la Semana 1, llega a medir 30 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ su valor más alto, en la Semana 2 la concentración más alta es de 40 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ y en la Semana 3 su mayor medición es de 30 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$.

A pesar de medir valores distintos, se puede apreciar en los gráficos (Véase el Anexo A.3) que el comportamiento de la curva es parecido entre los dispositivos estudiados, habiendo ciertas excepciones.

Entrando en más detalle al comportamiento del material particulado 2.5, de los gráficos se observa que hay mucha variabilidad en los datos y que no se observa patrones en horas específicas, hay días donde aumenta mucho la concentración y luego esta se mantiene un poco constante, entendiéndose, que no sobrepasa ciertos rangos.

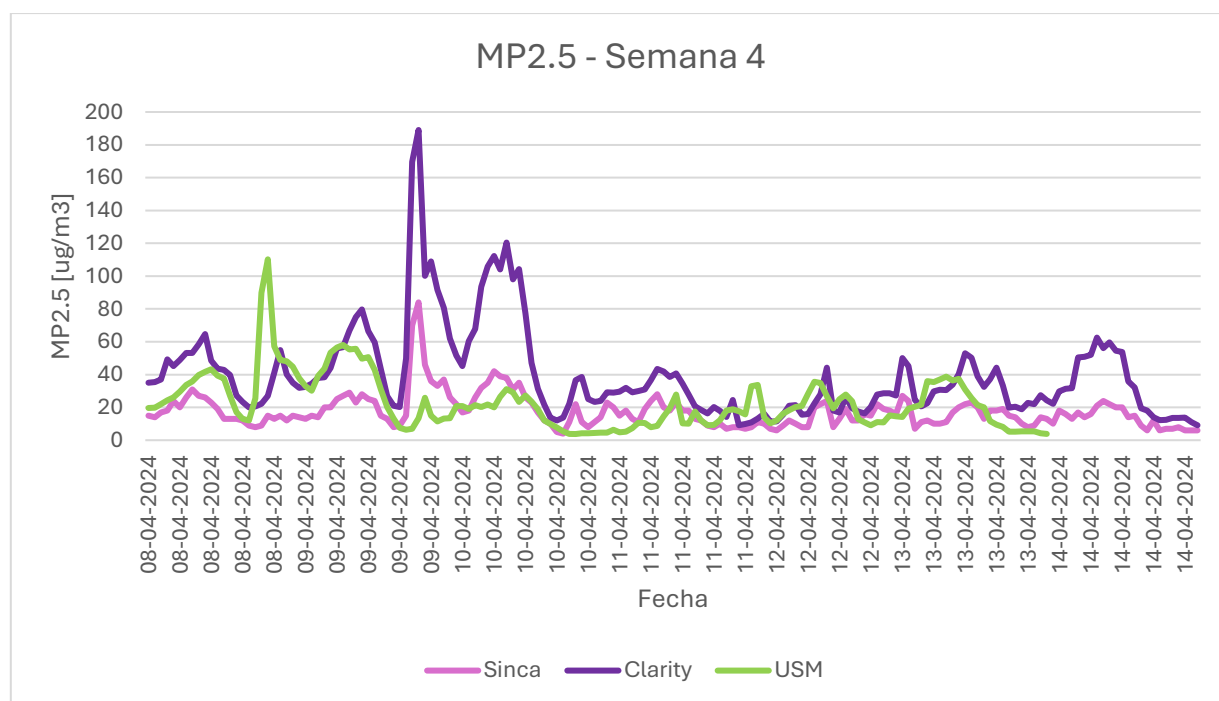


Gráfico 11: Datos horarios del MP2.5 extraídos de los dispositivos SINCA, Clarity y USM de la Semana 4.

En el Gráfico 12 se observa los promedios que obtuvieron cada dispositivo, señalando los límites de concentración MP2.5 de la OMS y la normativa chilena. El comportamiento del promedio es similar en los tres dispositivos, en donde aumentan o disminuyen en el mismo rango de tiempo. Solo se aprecia que en el día 12 de abril y 14 de abril la concentración de la red SINCA está por debajo de los 15 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$, mientras en los otros días las concentraciones están entre los 15 a 50 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ en todos los dispositivos, a excepción del día 09 de abril y 10 de abril, donde el sensor Clarity mide por sobre los 50 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$, llegando a lo que se considera en la normativa chilena una calidad de aire regular.

De los gráficos del Anexo A.3 correspondientes a las otras semanas, en la primera semana el sistema SINCA obtiene promedios por debajo de 15 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$, mientras que los demás dispositivos se encuentran por debajo de los 50 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$. Por otro lado, en la segunda semana, el sensor Clarity obtuvo un promedio diario por encima de los 50 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ en el 29 de marzo, y en el 30 de marzo obtuvo un valor igual a 50 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$. Ya para la tercera semana, las concentraciones de MP2.5 empiezan a bajar y los promedios diarios de cada dispositivo no logran superar los 50 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$.

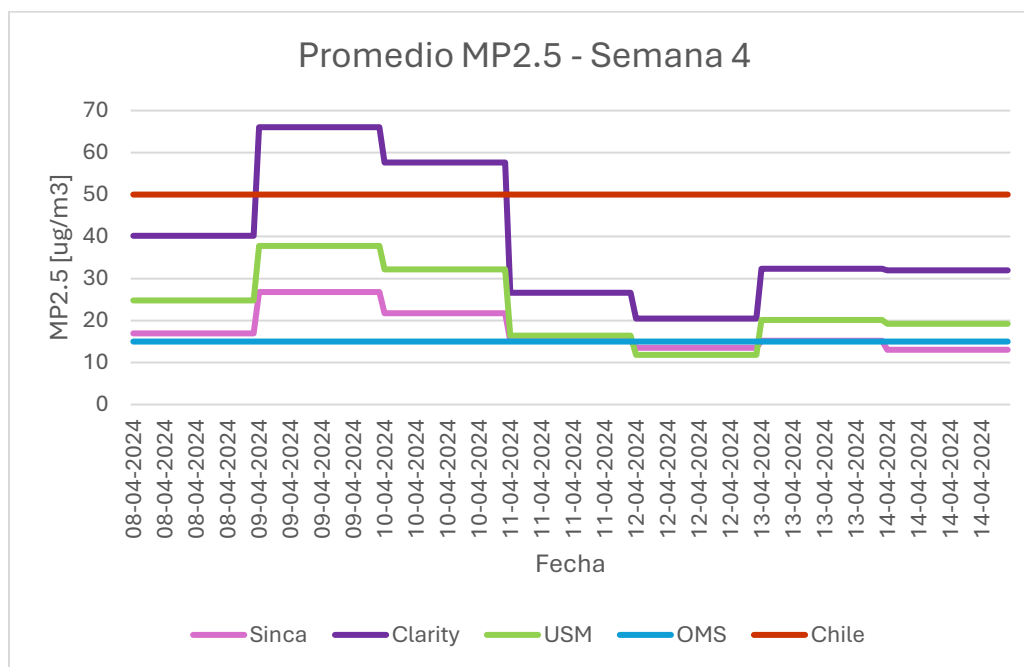


Gráfico 12: Promedios diarios del MP2.5 de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 4, en conjunto con las normas diarias de la OMS y chilena.

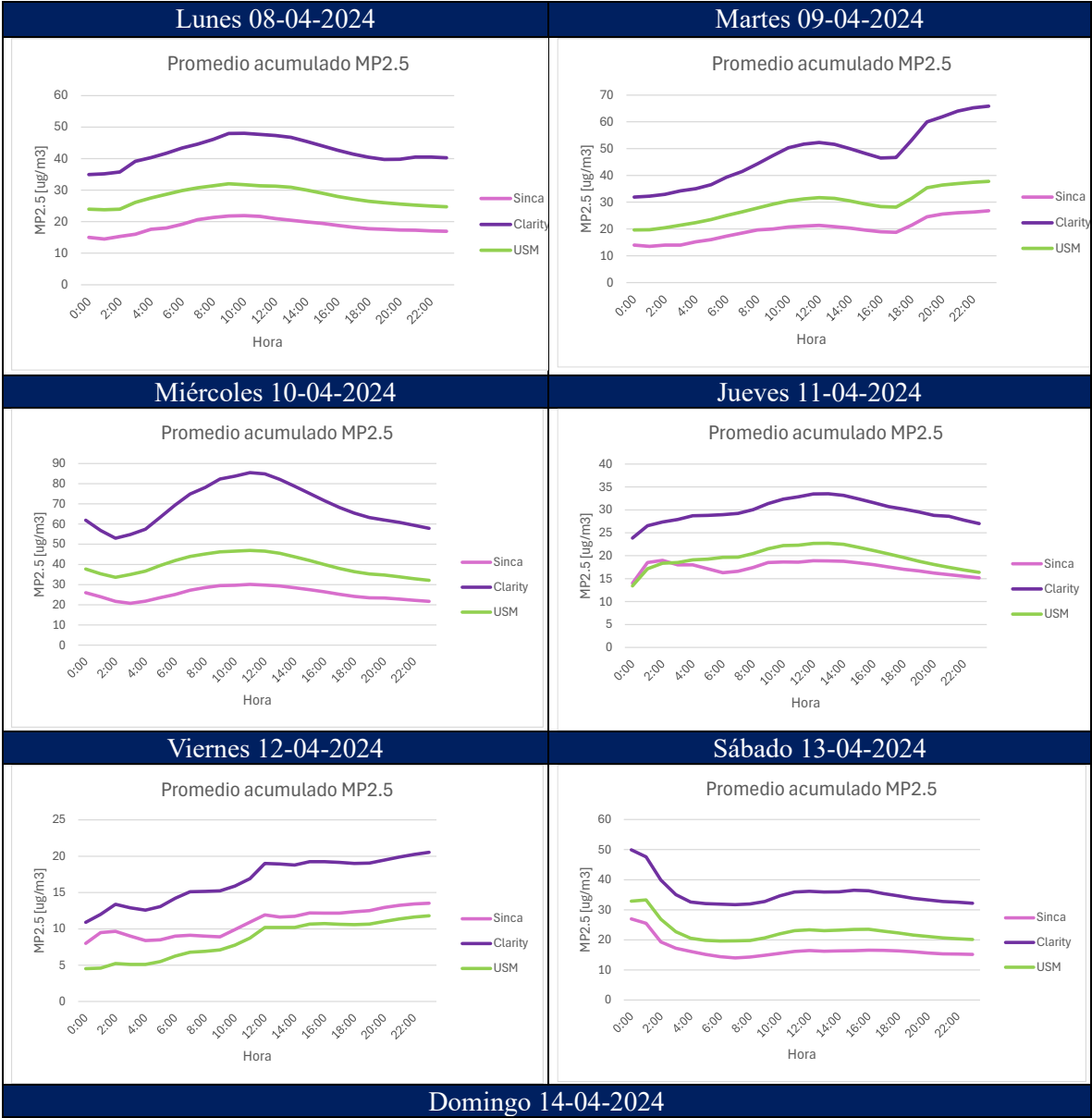
De la Tabla 23, la curva de los promedios acumulados de cada sensor se comporta de la misma forma, teniendo la misma ascendencia y descendencia en los horarios establecidos. Como se señaló anteriormente, el sensor Clarity demostraba tener mayor promedio diario que los otros dispositivos, por lo que evidentemente su promedio acumulado será mayor que los demás sensores. Se puede notar que el promedio acumulado cambia entre el prototipo USM y el SINCA dependiendo el día, mostrando que algunos días el prototipo USM tiene mayor promedio acumulado diario y en otros días menor en comparación al SINCA. Lo dicho también se cumplen en las tablas de las otras semanas.

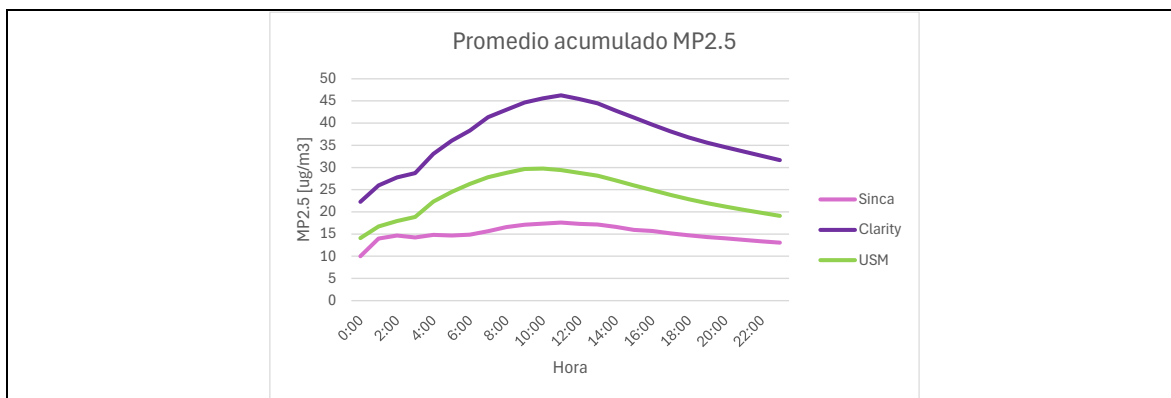
Las curvas de comportamiento reflejadas en los gráficos de la Tabla 23, demuestran un aumento en el promedio acumulado hasta llegar a su peak máximo para luego disminuir y llegar al promedio diario. Aparecen comportamientos inusuales en días específicos, tales como el martes 09 de abril, donde se generan dos peaks en las curvas, aumentando dos veces consecutivas el promedio acumulado y no respetando la curva usual que se genera. Por otra parte, se tiene el viernes 12 de abril donde se ve que la curva aumenta linealmente hasta llegar a su valor máximo.

Mientras que las otras semanas, los gráficos se comportan con la misma curva que se espera para el material particulado 2.5, sin embargo, hay excepciones. En la semana 1, el miércoles 20 de marzo se observa que la curva se comporta como dos pendientes donde una va decreciendo y luego llega a su menor valor para volver a crecer. El promedio acumulado que se obtuvo con las mediciones de SINCA el 20 de marzo, entrega una curva lineal que va aumentando, a diferencia de los otros dos dispositivos.

En la semana 3, se observa que el lunes 01 de abril la curva solo va aumentando, mientras que el miércoles 03 de abril, el promedio acumulado empieza con un descenso y luego empieza a ascender, obteniendo un comportamiento contrario al de la mayoría.

Tabla 23: Promedio acumulado horario del MP2.5 de cada día de los dispositivos SINCA, Clarity y USM, correspondiente a la Semana 4.





Para el análisis del NO_2 se considera las mediciones por hora del SINCA, Clarity y el dispositivo USM. A través del Gráfico 13 correspondiente a la cuarta semana (08/04/24 al 14/04/24) de la toma de datos, se muestran tres curvas correspondientes a cada dispositivo, siendo la del dispositivo Clarity la que demuestra un comportamiento diferente a los otros dos dispositivos, logrando medir hasta valores negativos, los cuales se consideraran 0 [ppb], ya que no puede existir concentraciones negativas. Se observa un constante crecimiento y decrecimiento en las muestras del sensor Clarity, rondando entre los 40 a los -20 [ppb]. Por otra parte, del dispositivo SINCA se observan valores que pueden llegar casi a las 60 [ppb], realizando las mediciones más altas en comparación a los otros dispositivos. El prototipo USM mide pequeñas cantidades de concentraciones a diferencia de los demás dispositivos, entregando un promedio horario máximo de aproximadamente 10,5 [ppb], a pesar de esto se observa que sigue el mismo patrón de comportamiento que SINCA. Como el gráfico corresponde solo a los promedios horarios que transcurre durante la semana es apropiado utilizar la norma chilena horaria del NO_2 . A simple vista, ninguna curva logra sobrepasar el nivel de concentración impuesta por la norma, por lo que indica una buena calidad de aire.

Observando los gráficos correspondientes a las otras semanas (Véase el Anexo A.3), el comportamiento es similar a la de la semana 4, donde los datos reportados por el SINCA siguen siendo mayores a los otros dispositivos, llegando a medir casi 74 [ppb] el 05/04/2024. Mientras que el sensor Clarity se asemeja un poco más a lo medido por SINCA, aunque sigue demostrando caídas abruptas hasta llegar a valores negativos. Por último, el dispositivo USM muestra promedios horarios con valores pequeños en comparación a los otros dispositivos, siguiendo el mismo patrón de comportamiento que el de SINCA. De igual manera, en todas las semanas se logran promedios horarios por debajo de la norma chilena, cumpliendo con la calidad de aire requerida.

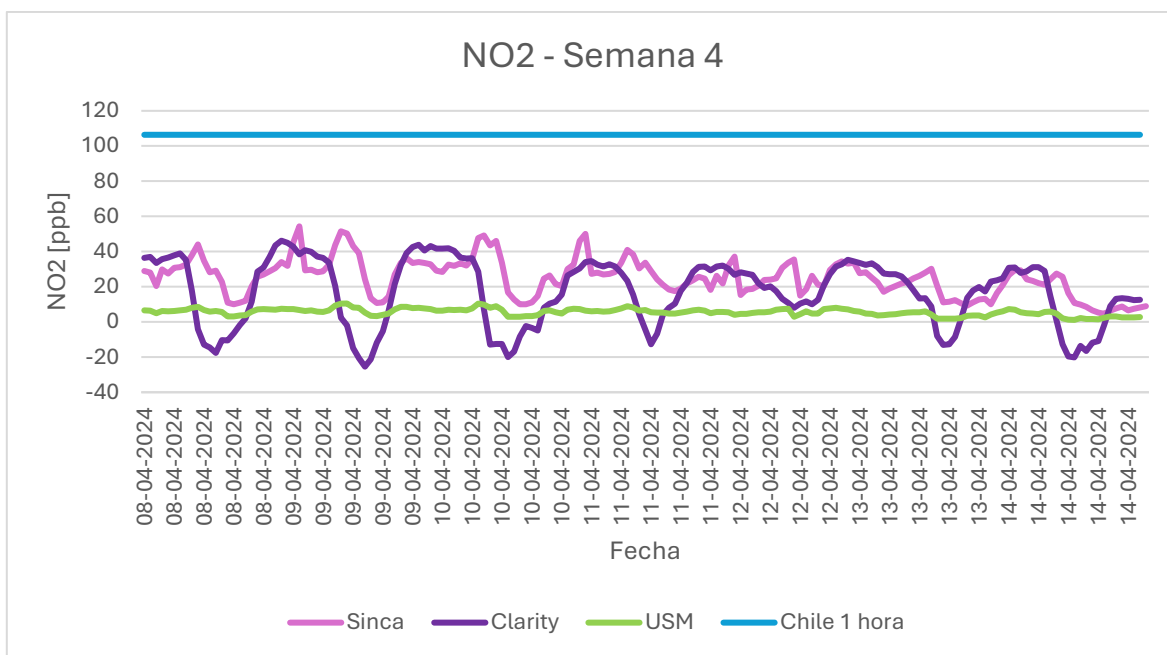


Gráfico 13: Datos horarios del NO₂ extraídos de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 4, en conjunto a la norma horaria chilena.

De acuerdo con la idea anterior, se decide graficar los promedios diarios de cada dispositivo a lo largo de la semana para poder comparar dichos valores con las normas tanto de la OMS con la chilena en un periodo de 24 horas. Del gráfico 14 se aprecia que el SINCA presenta un mayor promedio diario a lo largo de los días, superando así la norma de la OMS, pero no pudiendo superar la norma chilena. El mayor promedio diario que esta pudo medir es de 32,5 [ppb] en la semana 4, considerándose un valor relativamente bueno dentro de los límites chilenos. Por otra parte, el sensor Clarity llega a medir concentraciones más bajas de NO₂, sin embargo, solo logra posicionarse dentro de los límites de la OMS al último día de la semana. Ya por último se tiene el prototipo USM que mide promedios diarios por debajo de los 10 [ppb], resultando ser unos valores que poseen una gran diferencia con los otros dispositivos.

De las otras semanas, SINCA sigue encabezándose con los promedios diarios más altos, pero dentro de los límites de la norma chilena. Se observa, además, que el dispositivo Clarity mide promedios que van disminuyendo a lo largo de la semana, logrando estar dentro de los límites de la OMS tanto en la semana 1 como en la semana 2. Mientras que el dispositivo USM obtiene durante todas las semanas valores por debajo de los 13,29 [ppb]

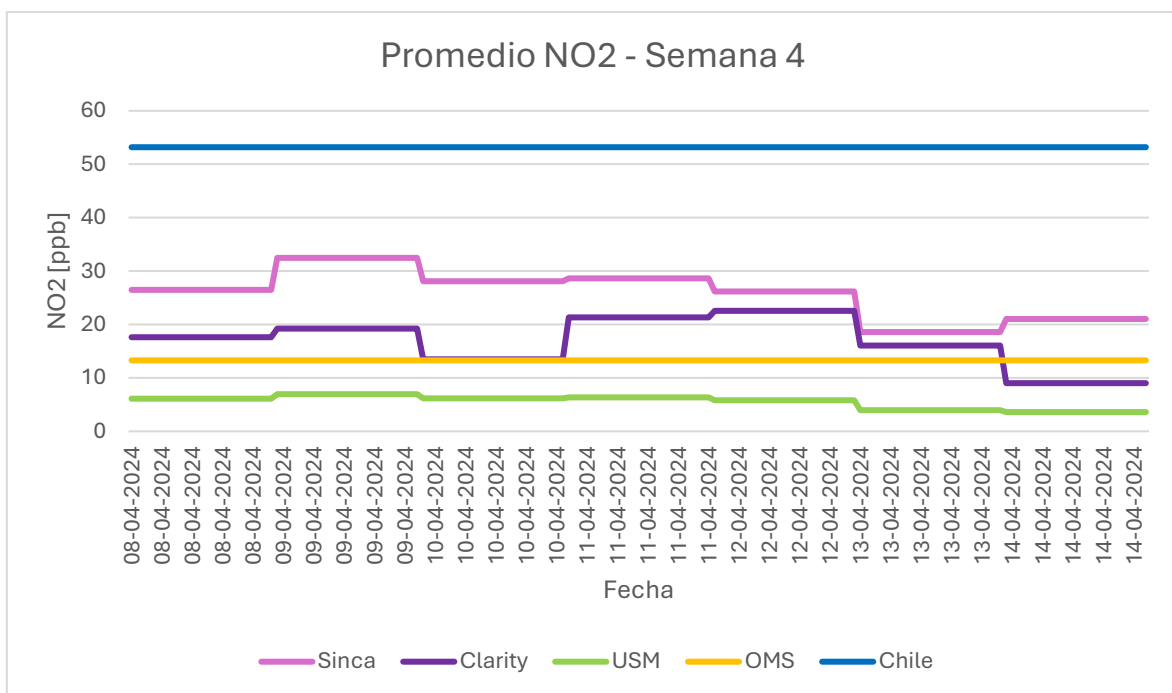


Gráfico 14: Promedios diarios del NO₂ de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 4, en conjunto con las normas diarias de la OMS y chilena.

Para un análisis más profundo del dióxido de nitrógeno en un entorno donde el flujo vehicular es bajo, se grafican las mediciones del Clarity (la cual es cada 15 minutos) y también las del dispositivo USM, donde las mediciones son cada 1 minuto, estos con apoyo de otro gráfico para observar cuanto varían las concentraciones. Como se menciona anteriormente, en la Sección 3.3.1, Clarity puede obtener un máximo de 4 variaciones en su medición dentro de 1 hora, por otro lado, el dispositivo USM, obtiene máximo 60 variaciones dentro de una hora.

En el Gráfico 15 se observa claramente las disminuciones y aumentos abruptos que presentan los valores cada 15 minutos, habiendo valores altos de aproximadamente 45 [ppb] para luego disminuir a valores aproximados a -30 [ppb]. Analizando la variación que se produce, del Gráfico 16, se observa que la mayoría de los datos varían entre -5 a 5 [ppb], dentro de este rango, la variación de -1 a 1 es la que tiene una mayor frecuencia. La disminución que se produce en el gráfico 16, se genera aproximadamente entre las 09:00 a.m hasta las 12:45 p.m y luego vuelve a aumentar hasta las 18:00 p.m.

Durante la semana 1, 2 y 3, los valores, en general, varían en su mayoría entre los rangos de -4 a 4 [ppb]. De la misma forma, como se menciona en el párrafo anterior, la disminución de la concentración se produce entre las 09:00 a.m hasta las 12:45 p.m para luego aumentar a hasta las 18:00 p.m.

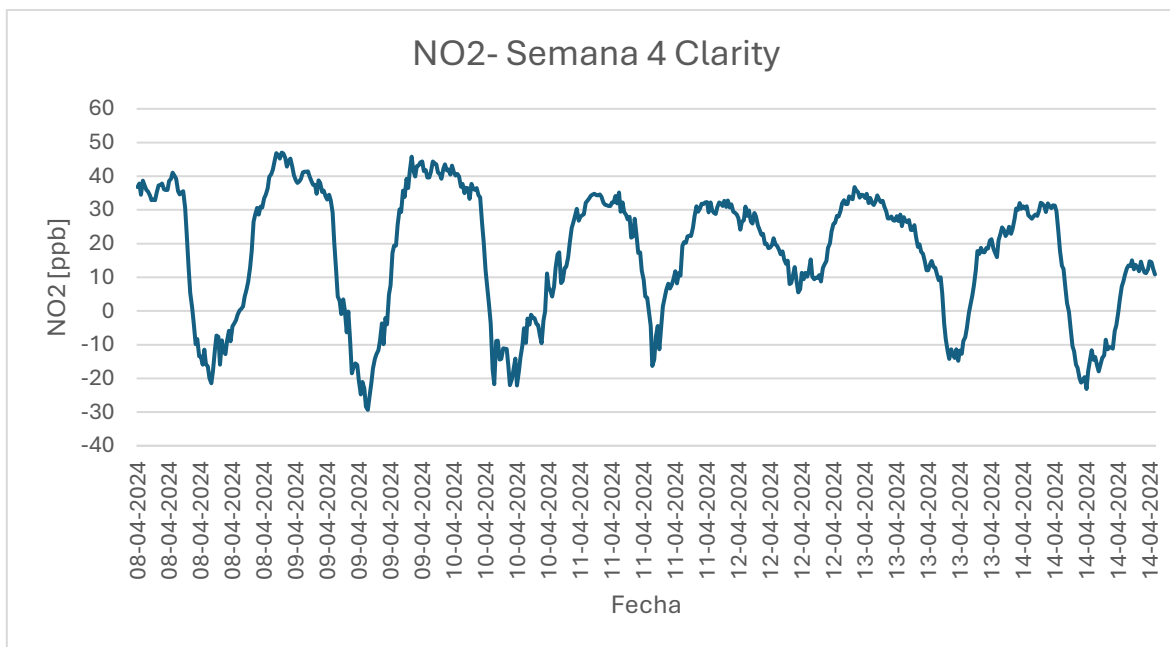


Gráfico 15: Mediciones cada 15 minutos del NO₂ del dispositivo Clarity de la Semana 4.

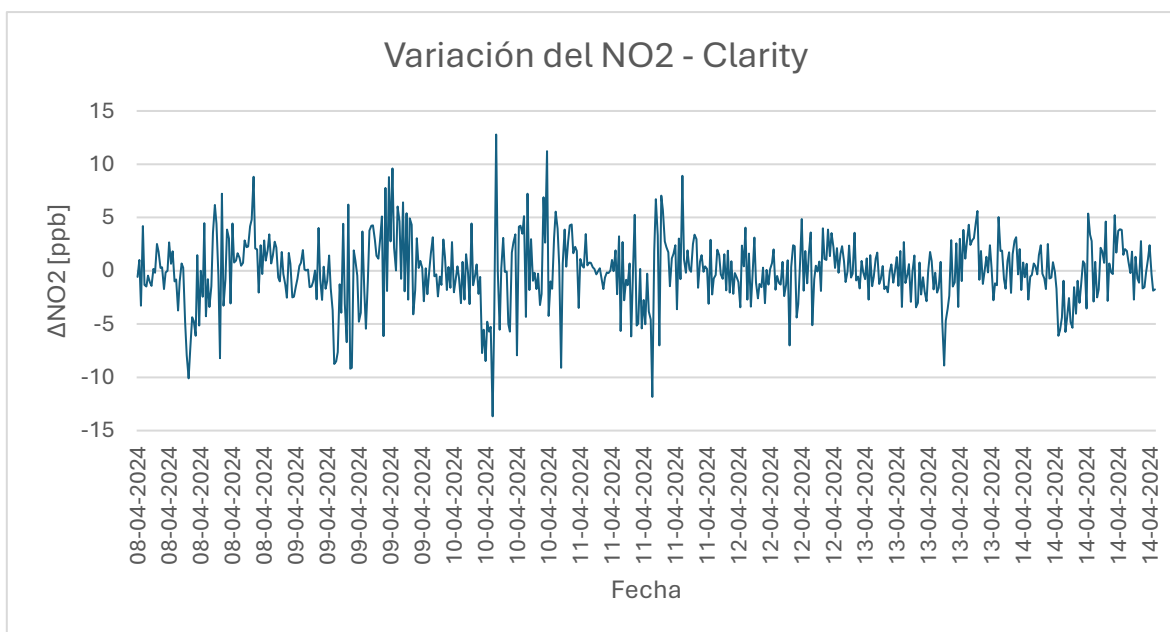


Gráfico 16: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO₂ del dispositivo Clarity de la Semana 4.

Por otra parte, el dispositivo USM mide valores distintos a los que se presenta en el Clarity, donde en el Gráfico 17 no se observa un comportamiento tan evidente como en el gráfico anterior. El dispositivo USM a través de los días ha logrado medir un valor máximo de 15,22 [ppb] presente en el entorno, mientras que su medición mínima ha sido aproximadamente de 0,5 [ppb]. Utilizando el Gráfico 18, las variaciones que demuestran más frecuencias se encuentran en un rango de -2 a 2 [ppb], siendo el valor -1 a 1 la mayor variación presente dentro del rango anterior, por lo tanto, no afecta de mayor manera el promedio horario final del NO₂. Las semanas anteriores a esta, también logran el mismo rango de variación que el de la Semana 4.

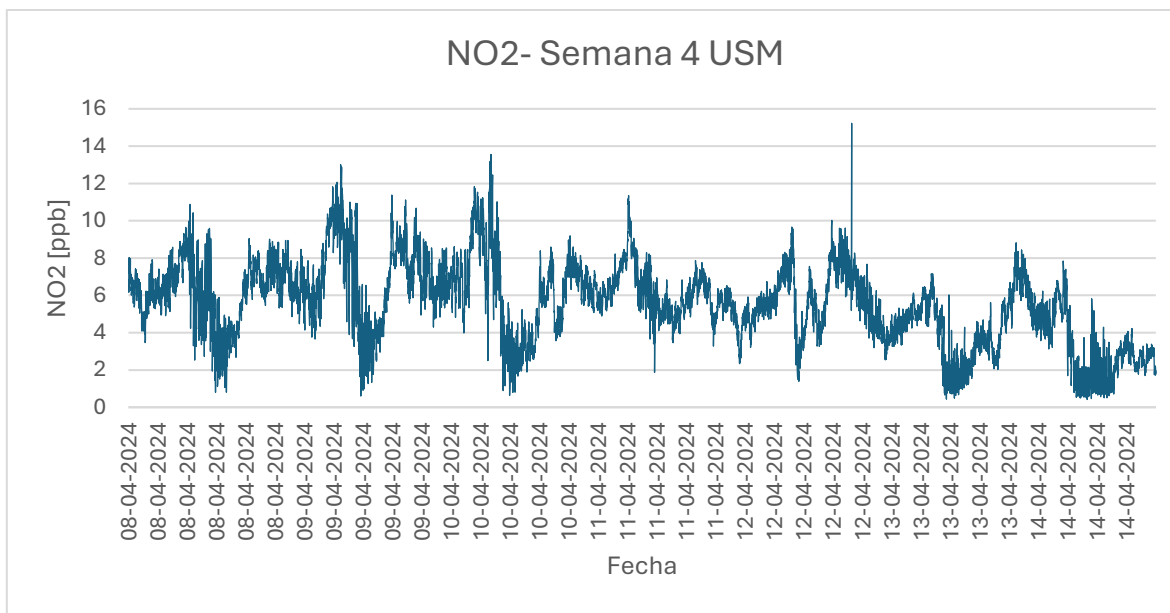


Gráfico 17: Mediciones cada 1 minuto del NO₂ del dispositivo USM de la Semana 4.

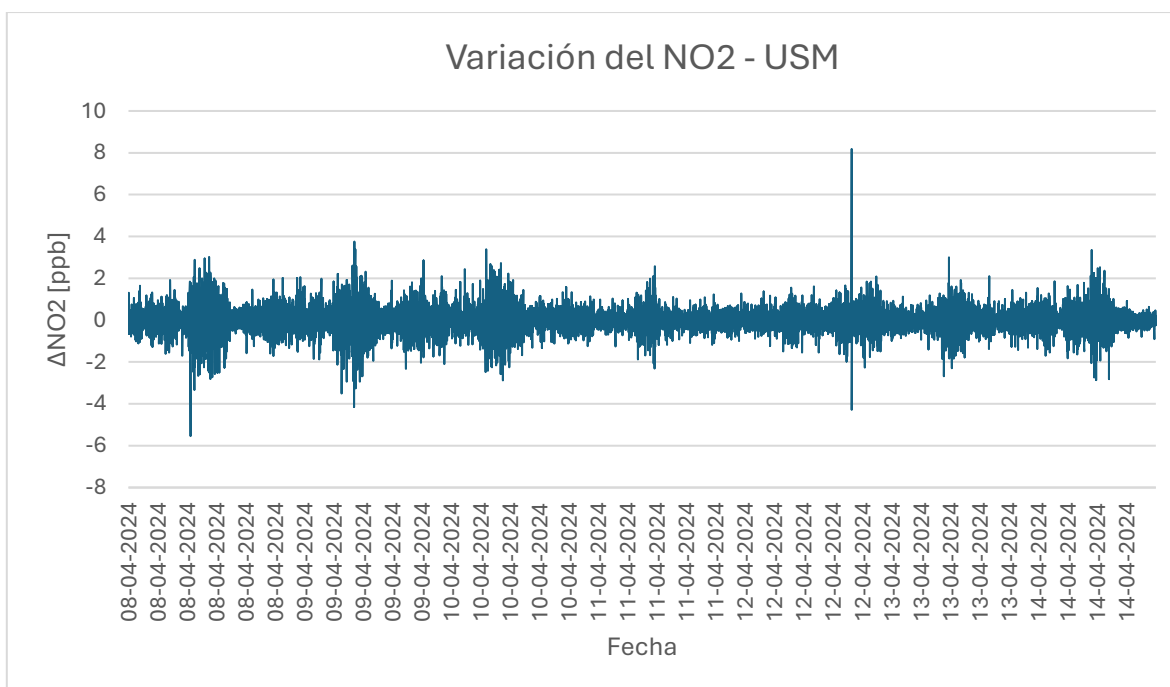
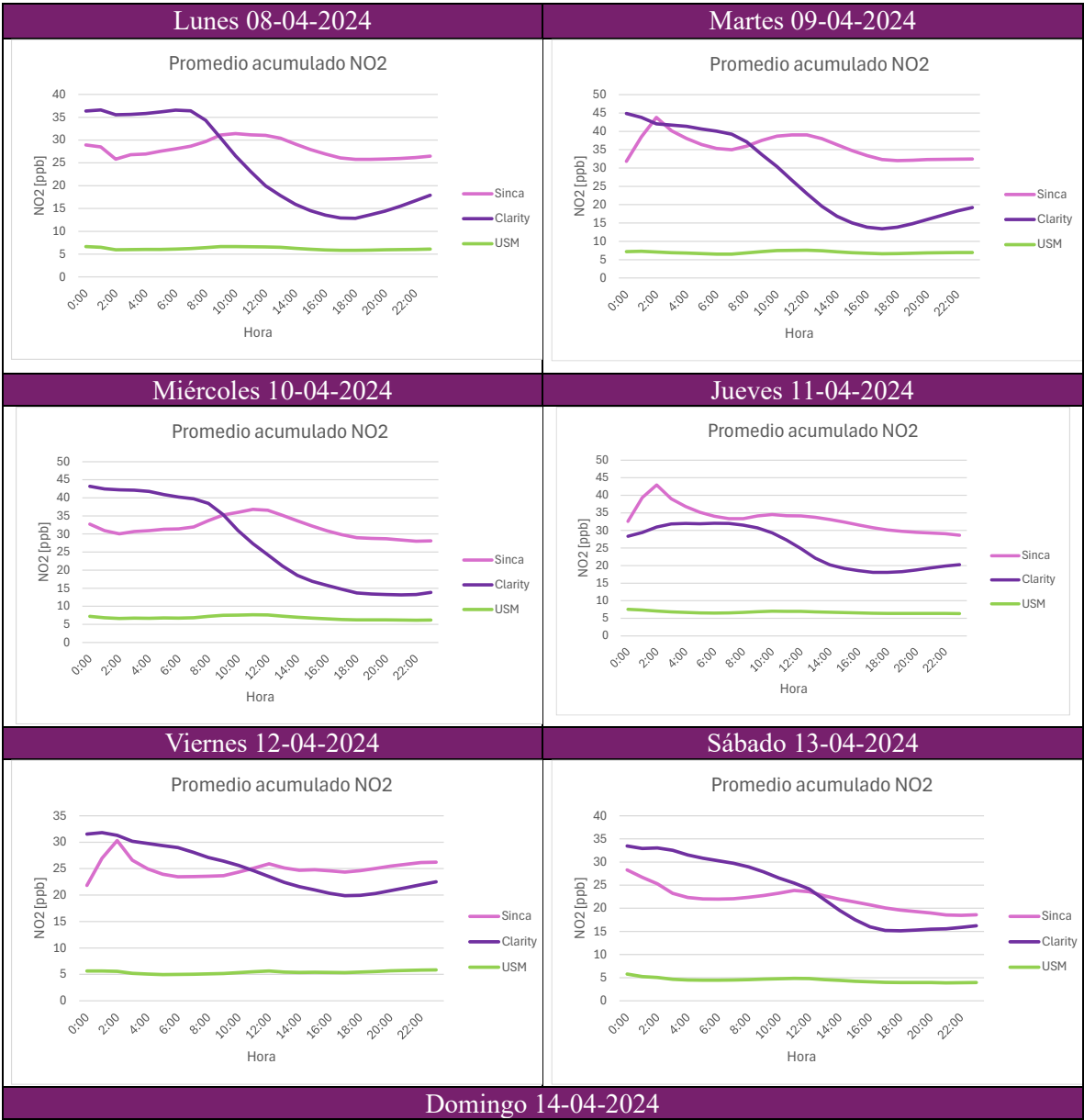


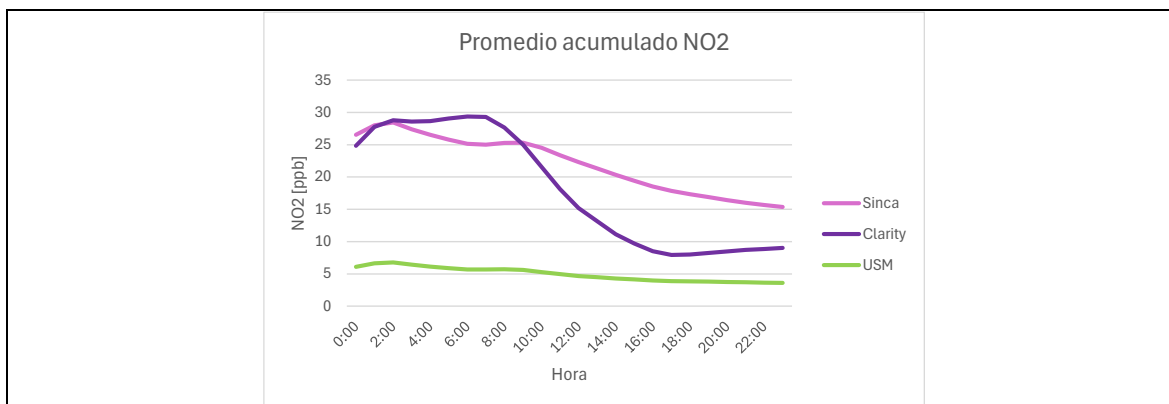
Gráfico 18: Variaciones de la medición de 1 minuto del NO₂ del dispositivo USM de la Semana 4.

Si se compara los promedios acumulados de los 3 dispositivos (Véase la Tabla 24), no se logra observar un comportamiento en común, solo se aprecia una intersección que se obtiene de los promedios del SINCA con el de Clarity. Pero analizando cada promedio acumulado por separado si se logra ver un patrón de comportamiento del NO₂. Del SINCA se observa un crecimiento lineal del promedio hasta las 02:00 a.m para luego disminuir y aumentar en forma de curva hasta las 12:00 p.m, siendo este su punto máximo, para después en la tarde disminuir y quedar en un valor casi constante. Por otra parte, el sensor Clarity empieza con un promedio acumulado alto, para que luego la curva

empiece a disminuir alrededor de las 06:00 a.m y las 07:00 a.m. Por último, el dispositivo USM no se logra ver cambios grandes en su promedio acumulado, manteniéndose casi constante con su promedio a través de las horas. Los comportamientos descritos anteriormente también se repiten en las semanas restantes.

Tabla 24: Promedios acumulados horarios del NO₂ de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 4.





3.3.6. Conclusión de la zona con baja densidad vehicular

Los dispositivos analizados anteriormente muestran una gran diferencia de la toma de datos que realizan, afectando los promedios diarios finales de cada contaminante, donde sensores como el Clarity llega a obtener promedios diarios que superan la norma chilena para una buena calidad de aire. Realizando una fijación en los otros dos dispositivos estos indican que en ningún momento de la semana el material particulado logra superar los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ impuesta por la norma. Si se guía por el dispositivo Clarity, este indica que la calidad de aire donde el flujo vehicular es muy reducido puede pasar de ser buena a regular. Mientras que los otros dispositivos indican que el promedio diario no logra sobrepasar los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y, por ende, la calidad de aire de todas las semanas ha sido buenas. Este último tiene más coherencia con el supuesto que uno tiene con respecto a lo bajo o nulo tránsito de vehículos. Recapitulando con el material particulado, el comportamiento que este presenta con su promedio acumulado indica que se puede comparar a una curva polinomial de grado 2, permitiendo predecir un valor máximo de promedio diario final que puede indicar el dispositivo. Aunque es claro, que se presentaran excepciones donde la curva se asemejará a un comportamiento lineal, por lo que se tendría que analizar en su momento que tanto va aumentando o disminuyendo al pasar las horas.

Con respecto a las mediciones del NO_2 se observa que el dispositivo de SINCA es el que logra medir mayores concentraciones de forma horaria y, por ende, tiene mayores promedios diarios sin embargo estos no logran sobrepasar los límites de la norma chilena. En segundo lugar, se tiene el sensor Clarity que logra medir concentraciones parecidas al SINCA, aunque este tiene disminuciones abruptas en su gráfico hasta lograr concentraciones horarias negativas, esto influye en el promedio diario del NO_2 logrando promedios más bajos. Y por último se tiene el prototipo USM que presenta valores muy bajos del NO_2 , lo cual es lo que uno supondría por el muy bajo flujo vehicular presente en el ambiente, logrando que pueda posicionarse por debajo de las normas de la OMS. En relación con las variaciones que se producen del NO_2 , en ninguno de los dispositivos se presentan grandes variaciones al pasar los minutos, siendo la más frecuente el rango $[-1 \text{ a } 1]$.

Comparando los tres dispositivos se observa un comportamiento donde el Clarity mide valores por sobre el prototipo USM tanto en el $\text{MP}_{2.5}$ como en el NO_2 , estando estos por sobre o debajo de las mediciones SINCA. Por otra parte, si no se considera el Clarity dentro de los gráficos, se puede decir que tanto el SINCA como el USM indican que la zona presenta una buena calidad del aire, mientras si se considera el Clarity se obtiene otro tipo de calidad de aire pudiendo pasar de buena a regular, habiendo una incongruencia con los otros dispositivos.

3.4. Conclusión del análisis de distintas zonas

De acuerdo con los análisis de los datos de la sección anterior se concluye que los promedios diarios del MP2.5 obtenidos entre las distintas zonas son bastantes parecidos entre sí, entrando en un rango de 8 a 30 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] (esto sin considerar las mediciones realizadas por Clarity en el Parque O'Higgins), indicando que la calidad de aire presente en diversas zonas de la Región Metropolitana es buena y está dentro de las normas establecidas. Además, al generar una curva del promedio acumulado horario del MP2.5 se observa un patrón de comportamiento similares entre sí, asemejándose a un comportamiento polinomial de grado 2. Dicha curva permitirá predecir la calidad de aire que puede presentarse en el día, aunque hay excepciones de curvas que no logran la forma dicha, con esto se considera observar como la curva se va formando a través de las horas para seleccionar el tipo de modelo a utilizar para la predicción en su momento. Una forma factible sería ver las variaciones que se producen del promedio acumulado actual con el promedio acumulado anterior, y ver si este tiene valores positivos, negativos o nulos. Para lograr esto, se debe redondear los valores y por lo menos visualizar que existan 3 valores consecutivos positivos para asumir que se generará la curva polinomial, una vez que la diferencia de valores sea 0 esto indicaría que la curva empezará a disminuir.

En relación con el NO_2 , se concluye que los promedios diarios de las tres zonas están dentro de los límites establecidos por la norma chilena, donde en ninguna zona se logra superar los 35 [ppb] por lo que se observa un buen control del NO_2 en la Región Metropolitana, siendo zonas que permite al transeúnte realizar actividades físicas. Con respecto a las variaciones que se presentaron durante cada 15 minutos o 1 minuto, se observa que no se genera mucha diferencia de un valor a otro, por lo que sería factible presentar los promedios acumulados dentro de una hora, tomando los valores de cada 15 minutos ya que no influiría mucho el cambio del promedio horario.

3.5. Organización de datos

La presentación de los datos debe adaptarse al público objetivo, entregando información comprensible y relevante según sus necesidades. Es fundamental que los datos se muestren de forma clara, utilizando tablas o gráficos, e incluyendo tanto datos históricos como los rangos permitidos por la normativa chilena.

El formato de los datos se organiza en tres categorías principales: básico, intermedio y avanzado:

1. Básico: Dirigida al público general, esta categoría presenta únicamente los valores esenciales, evitando un exceso de tecnicismos. El objetivo es facilitar el entendimiento y garantizar una visualización simple y no abrumadora para el usuario.
2. Intermedio: Diseñada para un público más específico, como el Gobierno Regional (GORE), esta categoría incluye información adicional considerada relevante. Los datos en este nivel permiten la toma de decisiones y el diseño de acciones concretas para mitigar los problemas relacionados con la contaminación.
3. Avanzado: Orientada a investigadores y académicos, esta categoría proporciona una visión completa de los datos disponibles, incluyendo análisis más detallados.

Esta estructura garantiza que los datos sean útiles y accesibles para diferentes públicos, al tiempo que mantiene un equilibrio entre simplicidad y profundidad según el nivel de especialización del usuario. En base a lo mencionado anteriormente se propone las siguientes presentaciones de datos según su categoría.

3.5.1. Tipo de usuarios

3.5.1.1. Usuario básico

El usuario debería ser capaz de poder tener acceso a los datos de cada sensor que este ubicado en la Región Metropolitana, es por esto, que una forma más practica para acceder a estos sería mediante un mapa en vivo. El mapa en vivo permite que sea más fácil visualizar los sensores que están en funcionamiento y, por ende, saber cómo está la calidad de aire en la ruta que el usuario va a transitar. Los datos que se debe proporcionar al usuario serian del MP2.5 y del NO₂, haciéndole entender que son los contaminantes que afectan a la salud humana y por esto es necesario su monitoreo.

La normativa chilena proporciona niveles de emergencia tanto del MP2.5 como del NO₂, con la diferencia que los periodos de concentración son distintos. Para el MP2.5, los límites de concentración son para cada 24 horas mientras que para el NO₂ son cada 1 hora (en el caso de los niveles de emergencia). Con ello, se propone presentar al usuario el promedio acumulado horario del MP2.5 tanto de manera gráfica como el valor actual, con el fin de que pueda comparar dicho valor con el de la norma. Por otro lado, para el NO₂ se puede presentar el promedio acumulado de cada 15 minutos, ya que este no presenta tantas variaciones con el promedio horario, por lo que es factible utilizarlo como un promedio móvil para comparar con la norma chilena de 1 hora de forma semanal.

Por último, se le permite al usuario tener acceso a datos históricos de su lugar de interés, este con el fin, de que pueda observar cómo ha sido la calidad del aire a través del tiempo. Los datos históricos se pueden presentar de manera gráfica y con los datos diarios.

3.5.1.2. Usuario intermedio

El usuario intermedio tiene el derecho de acceder a todo lo mencionado en el usuario básico, es decir, el mapa en vivo con sus promedios acumulados y el promedio horario, además de los datos históricos. Además, se propone que puedan buscar por el mapa en vivo el sensor de interés y usarlo como filtro. También sería apropiado que pueda acceder a los datos diarios, semanales y mensuales de los sensores de calidad de aire mediante gráficos. Y que, dentro de estos gráficos, este indicado los límites de la norma chilena cada 24 horas y cada 1 hora, en conjunto con los promedios diarios obtenidos al final del día.

Una herramienta útil es que exista una sección donde se genere un gráfico de promedio acumulado teórico que logre predecir como será la calidad del aire al final del día, este se utiliza como medio de prevención para tomar medidas al respecto.

Por otra parte, es importante conocer el estado en el que sensores operan, tomando en cuenta el nivel de batería que este posea y que tan buena es la conexión que tiene con la nube. Dentro de esta sección, se debe indicar que sensor necesita atención urgente.

3.5.1.3. Usuario avanzado

Para fines más académicos es apropiado permitir el acceso en tiempo real tanto del material particulado 2.5 como del NO₂, más específicamente, las concentraciones máscas calibradas, las concentraciones numéricas calibradas y el AQI, donde se permita además la descarga de datos en formato csv. Y que estos también incluyan tanto la humedad como la temperatura en la que se somete el sensor. Para evitar la saturación de datos se opta por utilizar filtros que permitan escoger la fecha de inicio y final, el sensor al cual se le quiere descargar los datos y el periodo de tiempo, este es cada 15 minutos, 1 hora o 24 horas.

Además, el usuario avanzado puede acceder a todas las herramientas que se le entrega al usuario intermedio y al usuario básico.

3.5.2. Indicadores cualitativos y cuantitativos

Los indicadores permiten al lector comprender de forma más clara y resumida la información presente, en este caso, los promedios diarios de las mediciones del MP2.5 y los promedios horarios del NO₂. A partir de estos, se consideran las últimas versiones de las normas chilenas. Tal y como se indica en el capítulo 1, 1.5.2 Norma Chilena, se indican los límites que debe cumplir la calidad del aire para que se considere buena y no tenga algún efecto negativo en la salud humana. Además, se presenta los niveles de emergencia y los rangos asociados a estos.

Como indicador, este debe poseer el rango de calidad de aire y nivel de emergencia para el lector, además también debe presentar, como el usuario puede interpretar esta calidad del aire y que debe ser respecto a esta información. A continuación, se presenta la escala de colores que se utilizará en cada nivel de emergencia.

Bueno	
Regular	
Alerta	
Preemergencia	
Emergencia	

Ilustración 10: Escala de colores para nivel de emergencia.

De acuerdo con las normas decretadas, se genera una tabla con los niveles de emergencia de concentración del material particulado 2.5 dentro de 24 horas.

Tabla 25: Rangos del nivel de emergencia en conjunto de la escala de colores del MP2.5 en un periodo de 24 horas.

Niveles de emergencia	Rango Niveles en $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$
Bueno	0 – 50
Regular	51 – 79
Alerta	80 – 109
Preemergencia	110 – 169
Emergencia	≥ 170

Por otra parte, la tabla generada para el dióxido de nitrógeno considera niveles de emergencia de 1 hora de concentración:

Tabla 26: Rangos del nivel de emergencia en conjunto de la escala de colores del MP2.5 en un periodo de 1 hora.

Niveles de emergencia	Rango Niveles en ppb
Bueno	0 – 106
Regular	107 – 265
Alerta	266 – 425
Preemergencia	426 – 744
Emergencia	745 o superior

Las tablas anteriores indican cuanta concentración se considera para cada nivel de emergencia, a modo de hacer más atractiva y comprensible la calidad de aire presente, es que se propone utilizar el siguiente indicador tanto para MP2.5 como para NO₂.

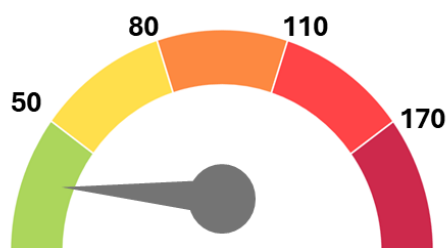


Ilustración 11: Indicador de calidad de aire del MP2.5 en [ug/m³]

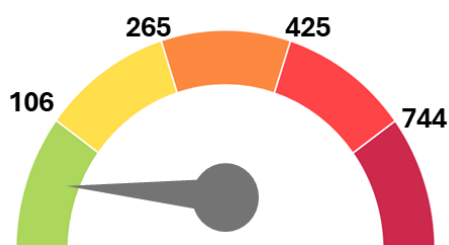


Ilustración 12: Indicador de calidad del aire del NO₂ en [ppb].

Además, como material de apoyo para los indicadores se propone indicar las recomendaciones de la guía del MINSAL³² según los niveles de emergencia:

Tabla 27: Recomendaciones del MINSAL para los niveles de emergencias correspondientes.

	Alerta	Preemergencia	Emergencia
Actividad física	Realizar actividad física en lugares lejos de alto tráfico vehicular y de preferencia en intramuros	Realizar actividad física en intramuros y alejados de lugares de alto flujo vehicular.	No realizar ninguna actividad física.

3.5.3. Prototipo del Dashboard

Con el fin de ayudar en la comprensión de lo descrito en la Sección 3.5 Organización de datos y 3.6 Indicadores, se realiza 3 prototipos de cómo se vería el Dashboard para los usuarios: básico, intermedio y avanzado.

3.5.3.1. Dashboard del usuario básico

Se propone que el usuario pueda observar en un mapa en vivo los sensores disponibles a lo largo de su ruta. Para ello, se implementarán dos barras de búsqueda: una para el inicio del recorrido y otra para el final. Esto permitirá que el transeúnte, especialmente aquel que desee realizar su trayecto en bicicleta, visualice gráficamente su recorrido en el mapa junto con la ubicación de los sensores cercanos. Por otra parte, sería interesante que el usuario pueda seleccionar cualquier sensor presente en el mapa y se despliegue en el un gráfico del promedio acumulado del MP2.5 o del NO₂ en conjunto con el valor del promedio acumulado actual. Adicionalmente, que se pueda observar la calidad del

aire presente que indique el sensor con el indicador de aire. Además, en la esquina inferior puede acceder a los datos históricos de los sensores, donde se muestran los datos horarios por semana.

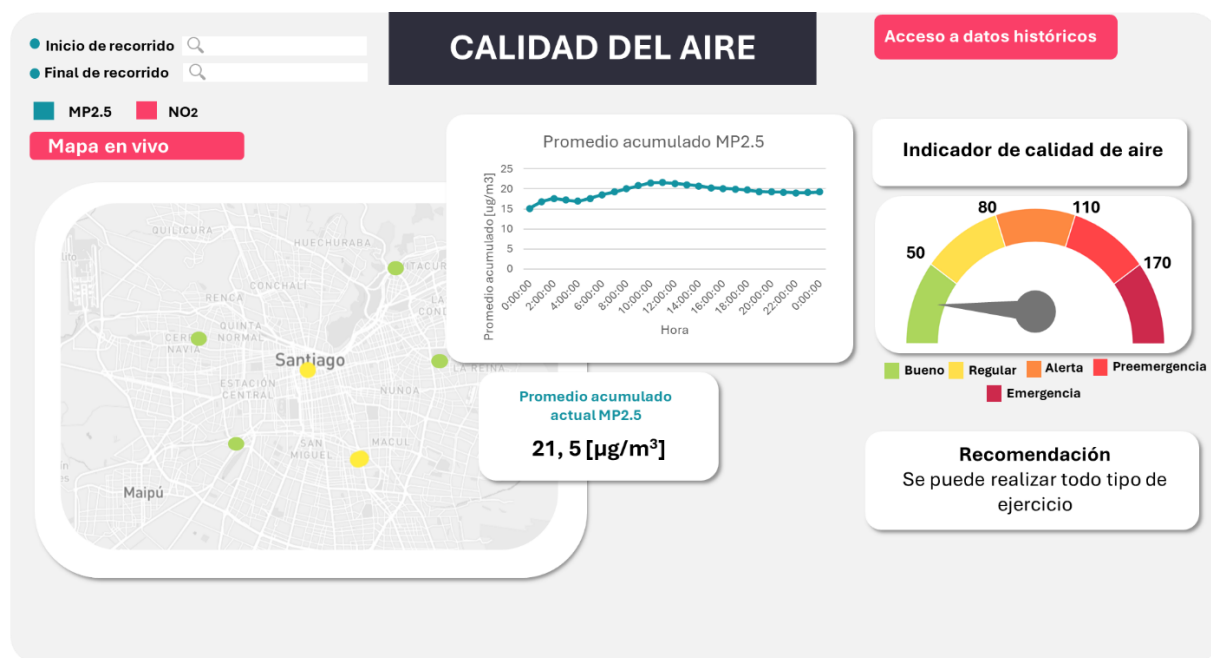


Ilustración 13: Prototipo de Dashboard del usuario básico.

3.5.3.2. Dashboard del usuario intermedio

Para el usuario intermedio se integran 3 herramientas adicionales a las que puede observar el usuario básico, donde el usuario puede ser capaz de visualizar en gráficos las concentraciones horarias, semanales o mensuales de los contaminantes MP2.5 y del NO₂. Otra opción disponible es la visualización del estado del sensor en caso de que este presente algún fallo, para que se realice una revisión o su mantenimiento. Además, su barra de búsqueda es distinta, ya que se permitirá que filtre por sensor o dirección los gráficos que desee ver.



Ilustración 14: Prototipo de Dashboard del usuario intermedio.

3.5.3.3. Dashboard del usuario avanzado

El usuario avanzado será capaz de acceder a los datos en crudo del sensor mediante la descarga de datos de csv, donde puede indicar el rango de fecha que desee, los sensores de los cuales requiere sus datos y, por último, el periodo de datos que indique.

CALIDAD DEL AIRE

Acceso a datos históricos

Dirección

Sensor

MP2.5 NO2

Concentración

Estado de sensores

Mapa en vivo

Descarga de datos csv

Diario Semanal Mensual

Fecha

Inicio Final

Sensor

Periodo de datos

☐ 15 minutos

☐ 1 hora

☐ 24 horas

Ilustración 15: Prototipo de Dashboard del usuario avanzado.

3.6. Conclusiones de la organización de datos

La organización de datos presentada permite a los usuarios acceder a los datos más importantes de acuerdo con su interés y especialización. Empleando los valores que se obtuvieron del análisis de la sección anterior y como estos pueden llegar a ser una buena representación para compararlo con las normas vigentes. El indicador permite comprender los niveles de emergencia al cual el usuario está sometido si se está expuesto al aire presente, dando además recomendaciones de las actividades que puede llegar a hacer. Para evitar que haya malinterpretaciones de los datos, se concluye no presentar al público las concentraciones que están presentes en los indicadores anteriores, esto con el fin de evitar comparaciones o confusiones con los datos entregados por SINCA y permitir que haya coherencia de las informaciones entregadas.

Por otra parte, la organización de datos presente no considera como enfrentarse al fenómeno “drift”, el cual son los cambios graduales que puede presentar un sensor a lo largo del tiempo, causando discrepancia con respecto a lo que se está midiendo, presentando un riesgo al entregar datos erróneos al usuario y que este decida sus acciones en base a estos.

4. Capítulo 4. Validación de dispositivo y plan de monitoreo.

4.1. Metodología para la validación

Para validar el sensor de calidad de aire del Capítulo 2 y el plan de monitoreo propuesto en el Capítulo 3, se realiza la siguiente metodología.

1. **Comparación de dispositivo:** Comparar las mediciones del sensor de calidad con los datos entregados en la red SINCA para validar el dispositivo permitiendo verificar su calibración.
2. **Diversas condiciones:** Someter al dispositivo en una zona que presente alta variabilidad de datos.
3. **Recolección de datos:** Determinar un periodo de tiempo para realizar las mediciones del sensor de calidad de aire y graficar los datos de manera diaria.
4. **Análisis de datos:** Analizar una cantidad de horas de medición del gráfico para identificar la tendencia de la curva permitiendo predecir la calidad del aire.
5. **Evaluación:** Evaluar la precisión del plan de monitoreo propuesto mediante la comparación de la calidad del aire real con la predicha.

4.2. Validación de los dispositivos

4.2.1. Resultados calibración dispositivo USM

La calibración de los sensores de calidad de aire del dispositivo USM se hizo durante el periodo de 7 semanas (entre 20/03/2024 y 10/05/2024) en el Parque O'Higgins, donde se encuentran las dependencias del SINCA. Realizando las mediciones y los ajustes necesarios para obtener valores similares al dispositivo SINCA. Se utiliza la técnica de regresión lineal para ajustar los datos de los contaminantes: MP2.5, NO y NO₂.³⁴

Mediante la regresión lineal se obtiene la transformación a través de una recta que se utiliza para aproximar los valores numéricos de los sensores a los entregados por los dispositivos del SINCA. La Tabla 28 indica los coeficientes de determinación obtenidos y los errores cuadráticos medios.³⁴

Tabla 28: Coeficientes de determinación (R²) y Errores Cuadráticos Medios (MSE) obtenidos con la calibración para las etapas de entrenamiento, validación y testing de PM 2.5, NO y NO₂.

	PM2,5			NO			NO ₂		
	Train	Val	Test	Train	Val	Test	Train	Val	Test
R ²	0,80	0,77	0,83	0,87	-84,88	0,86	0,77	-15,21	0,57
MSE	17,59	18,59	15,74	212,70	92980,66	207,42	31,60	1994,67	96,76

Los resultados indican que el MP2.5 y NO tienen un coeficiente de determinación R² de 0,83 y 0,86, mientras que para el NO₂ su valor es de 0,57. Es importante observar, que cuanto más cercanos sea

el R^2 a 1, mejor calibrados estarán los sensores. Por otro lado, cuanto más cercano sea el MSE a 0, más similares serán los valores calibrados a los medidos en la estación SINCA.

A continuación, se presenta el ajuste obtenido mediante la regresión lineal, la cual se aprecia en las Ilustración 16, Ilustración 17 e Ilustración 18 para el MP2.5, NO y NO₂. Los puntos azules corresponden al cruce de valores entre las mediciones obtenidas de los sensores de bajo costo y los reportados por el SINCA. Se observa que se ajusta adecuadamente a la recta roja generada por los regresores utilizados. Comparando las tres figuras, el material particulado 2.5 muestra una mayor estabilidad visual en su calibración, mientras que en el NO y NO₂ se presencia ciertas anomalías, las cuales se alejan de la curva propuesta. Un factor que puede explicar dicha anomalía es la detección en numeradas ocasiones de una humedad relativa mayor al 85%, excediendo los límites especificados de los sensores, afectando así su calibración.³⁴

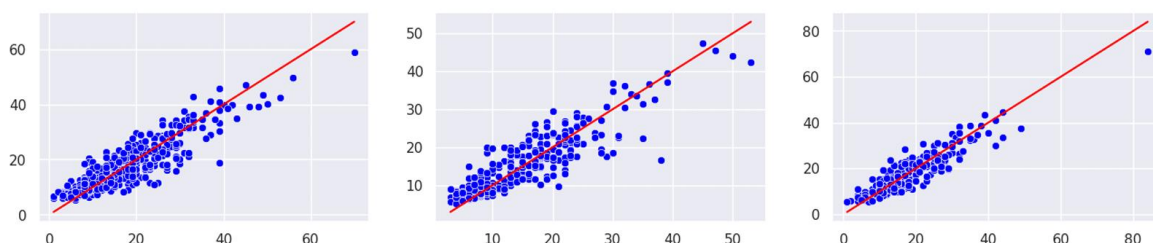


Ilustración 16: Calibración de Sensores MP2.5: Curva de aproximaciones obtenidas sobre el sensor PLANTOWER PMS7003. La recta roja es la curva de ajuste entregada por la regresión lineal, y los puntos azules representan los cruces entre el dato del sensor bajo costo y el valor en ese momento reportado por SINCA. Los resultados se dividen en tres conjuntos de datos: entrenamiento, validación y testing. Entre más se acerquen los puntos azules a la recta roja, mejor es la calibración.

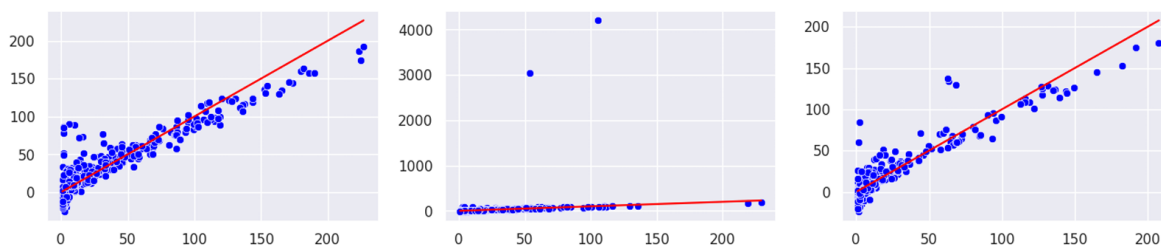


Ilustración 17: Calibración de Sensor NO: Curva de aproximaciones obtenidas sobre el sensor Alpha-Sense NO-B4. La recta roja es la curva de ajuste entregada por la regresión lineal, y los puntos azules representan los cruces entre el dato del sensor bajo costo y el valor en ese momento reportado por SINCA. Los resultados se dividen en tres conjuntos de datos: entrenamiento, validación y testing. Entre más se acerquen los puntos azules a la recta roja, mejor es la calibración.

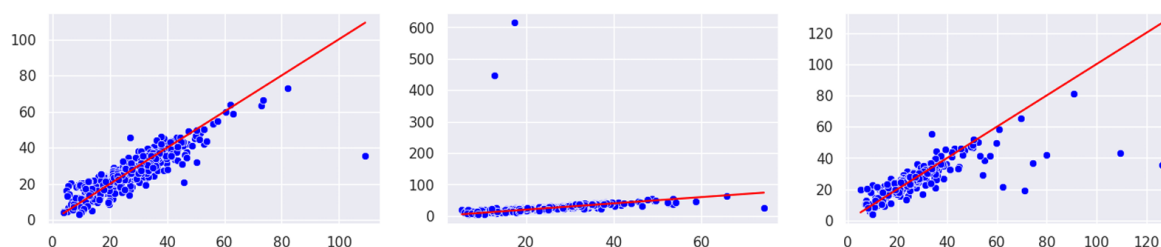


Ilustración 18: Calibración de Sensor NO2: Curva de aproximaciones obtenidas sobre el sensor Alpha Sense NO2-B43F. La recta roja es la curva de ajuste entregada por la regresión lineal, y los puntos azules representan los cruces entre el dato del sensor bajo costo y el valor en ese momento reportado por SINCA. Los resultados se dividen en

tres conjuntos de datos: entrenamiento, validación y testing. Entre más se acerquen los puntos azules a la recta roja, mejor es la calibración.

A pesar de las anomalías presentadas anteriormente, se observa en la Ilustración 19, Ilustración 20 e Ilustración 21, comportamientos similares del prototipo con respecto al SINCA. Por lo que se puede lograr aproximar los patrones de crecimiento y decrecimiento de MP2.5, NO y NO₂ que tendrían los dispositivos del SINCA.

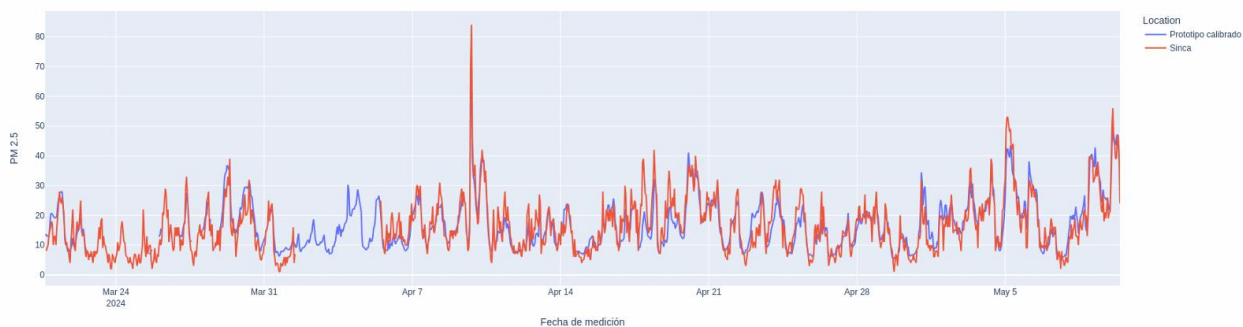


Ilustración 19: Calibración Sensor MP2.5: Comparación entre mediciones obtenidas por el prototipo obtenidas por el prototipo del Producto 5 y las mediciones reportadas por la estación del SINCA Parque O'Higgins. Entre mayor sea el traslape entre las curvas, mejor es la calibración.

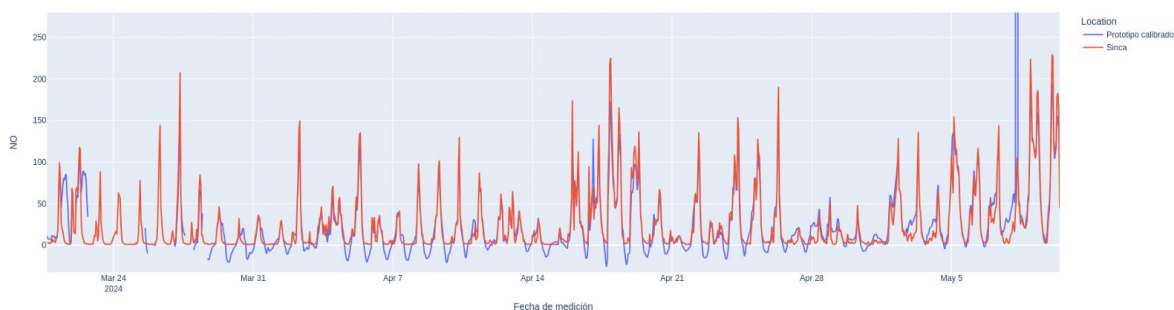


Ilustración 20: Calibración de Sensor NO: Comparación entre mediciones obtenidas por el prototipo del Producto 5 y las mediciones reportadas por la estación del SINCA Parque O'Higgins. Entre mayor sea el traslape entre las curvas, mejor es la calibración.

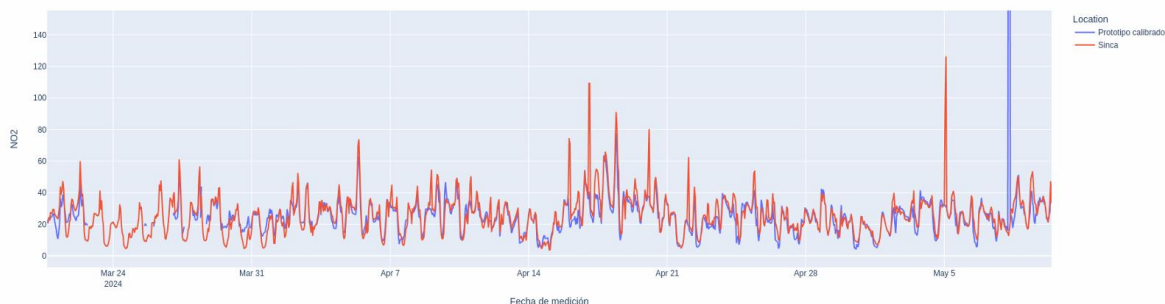


Ilustración 21: Calibración Sensor NO2: Comparación entre mediciones obtenidas por el prototipo del Producto 5 y las mediciones reportadas por la estación del SINCA Parque O'Higgins. Entre mayor sea el traslape entre las curvas, mejor es la calibración.

4.2.2. Validación del sensor seleccionado

El sensor que fue seleccionado por el Gobierno Regional para realizar las mediciones de los contaminantes fue el sensor Clarity. Las formas de para poder validar la calibración de un dispositivo, puede ser sometiéndolo a pruebas de laboratorio donde se tiene un ambiente controlado o comparar los valores de las mediciones con un estándar de referencia. Se elige la segunda opción para comprobar la calibración del sensor y, en consecuencia, se utiliza los reportes generados del SINCA como referencia. Con esto, se instala el dispositivo Clarity en las estaciones del SINCA ubicados en el Parque O'Higgins e inicia su toma de muestra de datos desde el mes de abril del 2024 hasta agosto del 2024. Como resultado se obtiene el Gráfico 19, que compara las curvas generadas del Clarity, SINCA y del prototipo USM (K307).³⁴



Gráfico 19: Datos correspondientes al MP2.5 desde el mes de abril hasta el mes de agosto.

Del gráfico anterior, se observa como las curvas de los datos de Clarity realizan el mismo patrón de comportamiento que el de SINCA, sin embargo, entrega valores más elevados, en comparación a las lecturas del dispositivo SINCA. Este resultado, cuestiona la calibración que tiene Clarity en sus dispositivos, ya que la diferencia de datos no es menor. Este ha llegado a casi triplicar el valor que reporta SINCA, indicando niveles de concentraciones del MP2.5 altos en el entorno estudiado.

Una opción que se propuso como razón de la desviación de datos, es debido a la interferencia ambiental al que estuvo sometido el sensor Clarity, es decir, una humedad relativa mayor al 85%. Esto no indicaría que el sensor realiza mala mediciones, puesto que realiza las mismas tendencias que presenta SINCA. Por lo cual, es necesario realizar un ajuste en su calibración para entregar datos más cercanos al de referencia.

Otra opción, es que el sensor Clarity tenga una sensibilidad excesiva, lo que puede generar sobreestimaciones en los valores entregados, siendo este más un problema de software.

4.2.3. Conclusión de dispositivos

El dispositivo USM logra mostrar una buena calibración con respecto al MP2.5 debido a su coeficiente de determinación R^2 , por otro lado, en las mediciones del NO_2 no es muy acertado, ya que tiene un R^2 de 0,57 muy alejado de llegar a 1. En consecuencia, se explica su valor por la humedad relativa presente en el ambiente, en ese caso, sería recomendable rediseñar la estructura donde está ubicado el sensor. Arreglar la calibración del dispositivo USM lograría demostrar ser competitivo para el dispositivo Clarity.

Con respecto al dispositivo Clarity este demuestra un comportamiento lejano al del dispositivo SINCA el cual es utilizado como base, llegando a tener el triple de valores de los reportados en el dispositivo de referencia. A pesar de esto Clarity indica un patrón semejante, por lo cual esto indica que factores externos pudieron afectar la medición de los contaminantes. Es importante detectar el factor principal de su des calibración, ya que sus reportes podrían indicar otra calidad de aire que no representa la realidad.

A pesar de los valores mostrados por ambos dispositivos y el comportamiento presentado durante sus mediciones, no implica que no deban ser utilizados para su operación. La sensibilidad con la que operan los sensores provoca que sus valores sean más altos, sin embargo, la recalibración de los dispositivos permitiría su buena operación y entrega de datos.

4.3. Validación del plan de monitoreo

4.3.1. Zona de prueba

Para validar el plan de monitoreo, se selecciona una zona de prueba con el fin de predecir las mediciones de los contaminantes presentes en el aire. Se opta por utilizar el sensor Clarity, ubicado en San Joaquín de la Sección 3.3.2 Zona industrial, debido a que esta área presenta una mayor variabilidad en los datos, generando gráficos con curvas diversas que permiten poner a prueba lo propuesto previamente. Para ello, se elige un periodo de tiempo para la recolección de datos y observar si presenta al igual que en las otras zonas estudiadas las curvas polinomiales en el promedio acumulado. El periodo de tiempo es desde el 16/12/2024 hasta el 22/12/2024.

4.3.2. Recolección de datos

Se realiza una descarga de datos desde las 00:00 del día 16/12/2024 hasta el 00:00 del día 23/12/2024, los datos corresponden a las mediciones horarias que realiza el sensor Clarity, esto para facilitar la generación de gráficos. A continuación, se presenta los gráficos obtenidos de cada día con su respectivo promedio.

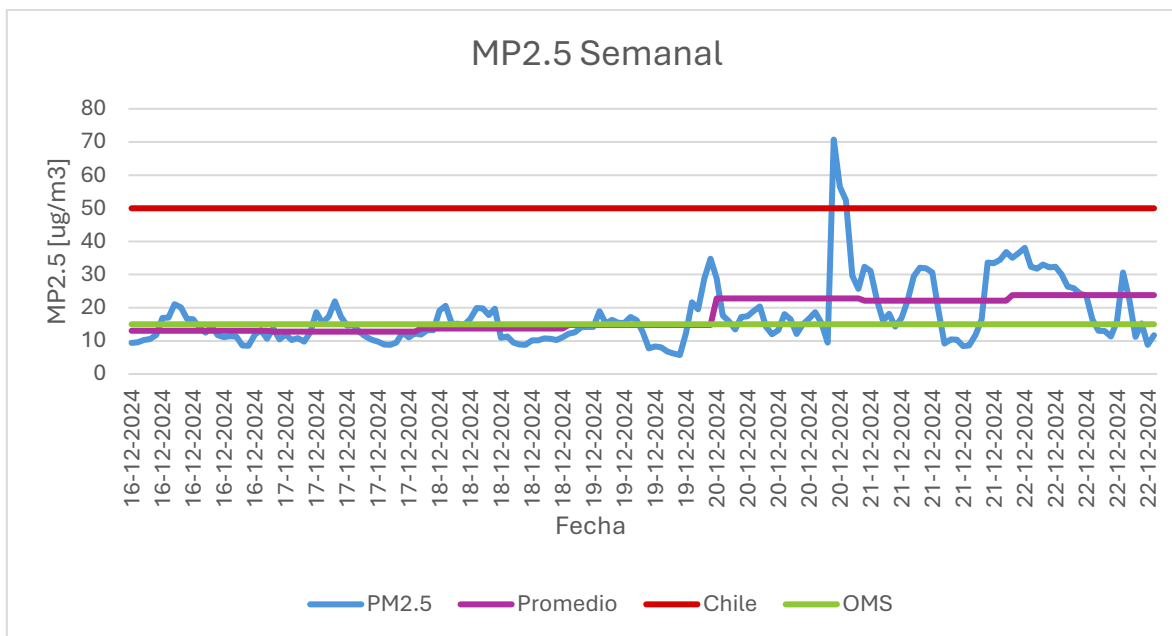


Gráfico 20: Datos por hora del MP2,5 obtenidos con su promedio diario y los límites de promedio diario de la OMS y de las normativas chilenas.

Del Gráfico 20, se evidencia visualmente la variabilidad del MP2.5 que se presenta durante la semana, habiendo días que la concentración horaria del material particulado sobrepasa los 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras existen otros días que la concentración logra estar por debajo de los 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A partir de esto, se generan promedios diarios de aproximadamente 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y también alrededor de 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, habiendo casi una diferencia de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre los promedios. A raíz de lo observado en la Sección 3.3 Análisis de datos, es esperado que se puedan producir concentraciones altas durante la semana y que, sin embargo, no logre que el promedio sobrepase las normas chilenas.

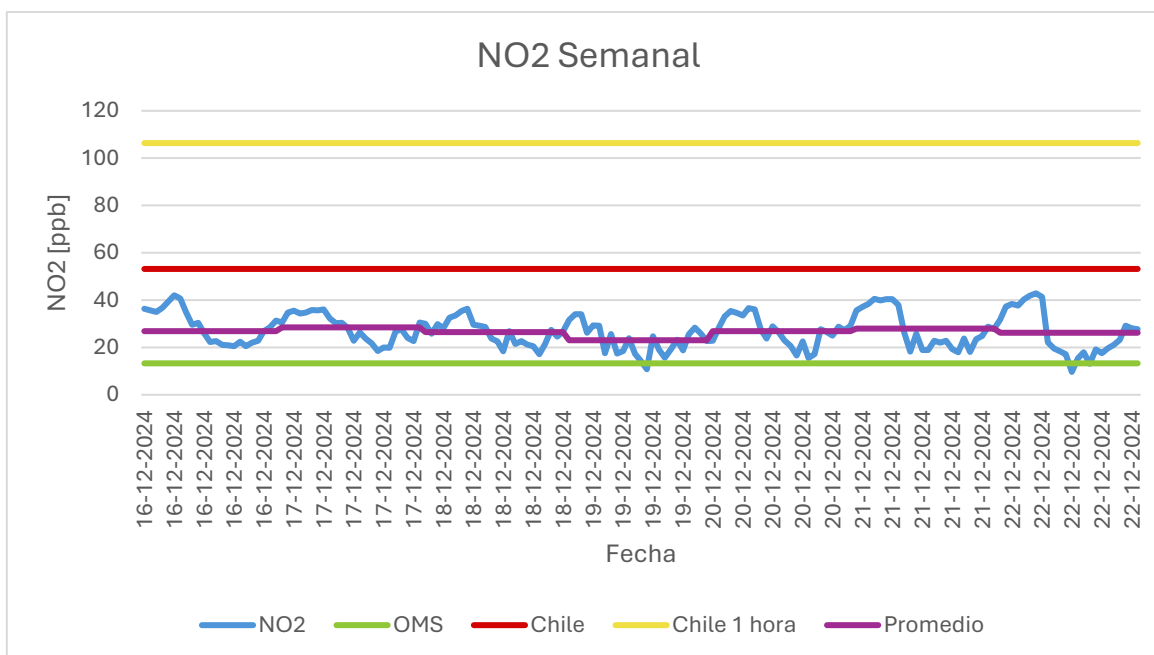


Gráfico 21: Datos por hora del NO₂ obtenidos con su promedio diario y límites del promedio diario y horario de la OMS y normativas chilenas.

Del Gráfico 21 se observa que el promedio diario obtenido del NO₂ no logra sobrepasar los límites de la normativa chilena, donde el promedio diario llega a obtener un valor máximo de 28,5 [ppb], siendo un valor que se sigue repitiendo dentro de la zona industrial como se analizó en la Sección 3.3 Análisis de datos. Por otra parte, los datos por hora tampoco logran superar la norma horaria chilena, indicando que durante la semana del 16 de diciembre la calidad del aire fue buena.

4.3.3. Análisis de los promedios acumulados del MP2.5

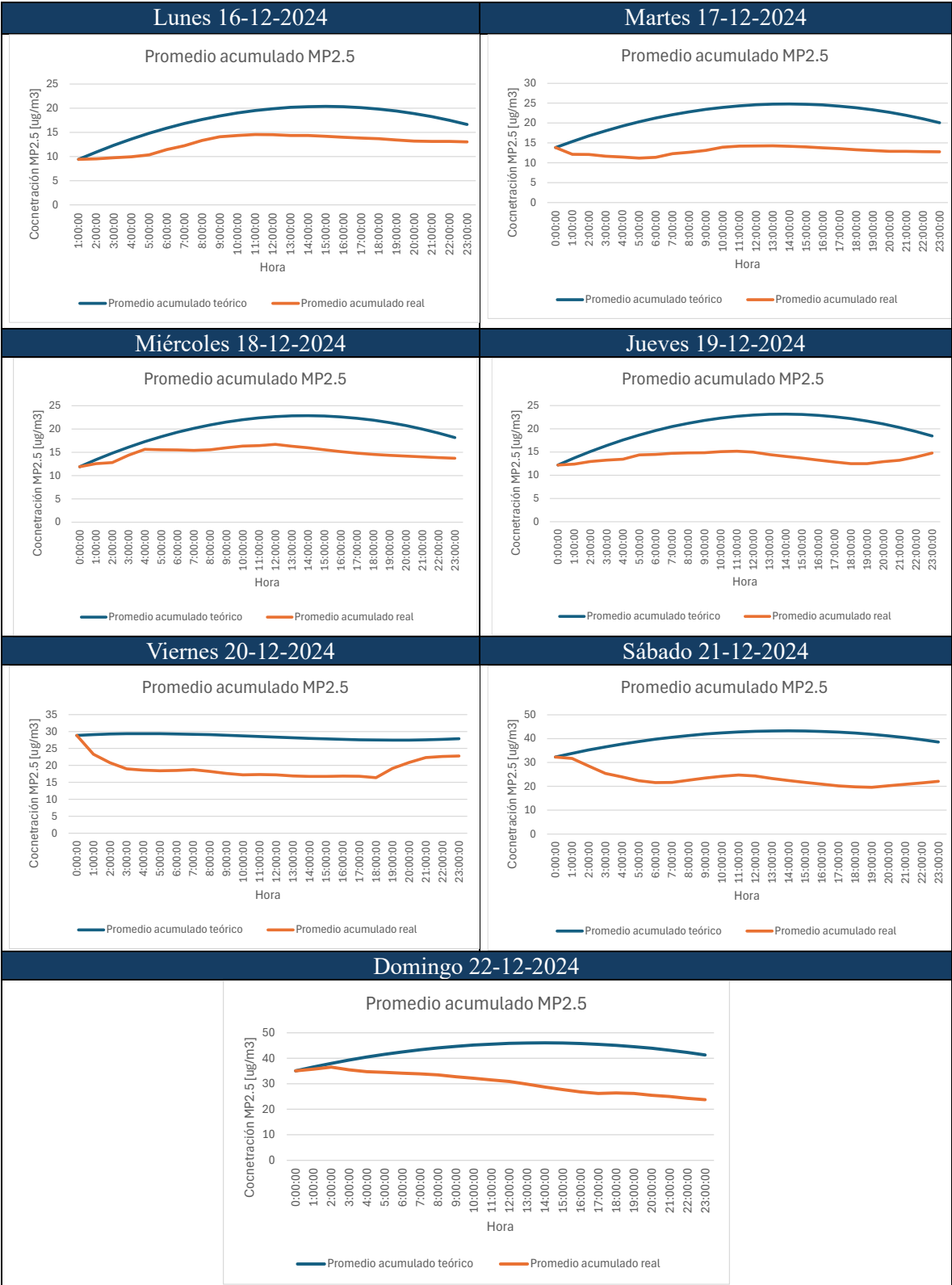
A partir de las conclusiones obtenidas en la Sección 3.3 Análisis de datos, se espera que el comportamiento del promedio acumulado siga una curva polinómica de grado 2. Para predecir esta curva, se propone utilizar una ecuación polinómica base de la forma:

$$y = ax^2 + bx + c + C_1$$

donde x representa las horas e y corresponde a la concentración horaria, mientras que C_1 es un coeficiente que varía según la primera concentración horaria. El polinomio base se obtiene a partir de la medición que mejor se ajusta a la curva esperada, y se verifica que el coeficiente de determinación R^2 sea lo más cercano posible a 1.

No se espera que el promedio diario obtenido de la recta polinómica coincida exactamente con el valor promedio diario real del día; más bien, se busca estimar el máximo promedio diario posible, lo que permitirá realizar las acciones correspondientes según al nivel de emergencia que pertenezca. A continuación, se generan los gráficos del promedio acumulado diario real y del promedio acumulado teórico.

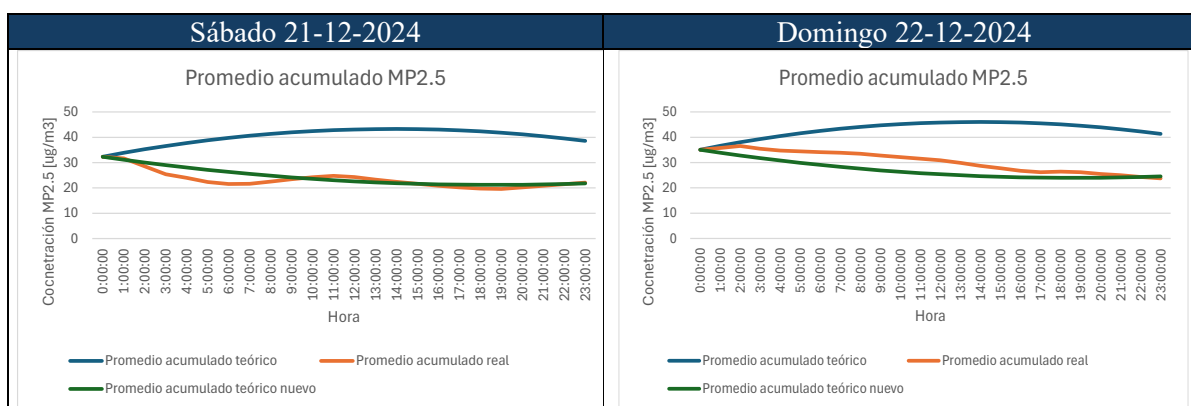
Tabla 29: Promedio acumulado del MP2.5 horario teórico vs el real.



De los gráficos de la Tabla 29 se puede observar que la curva que se genera por el promedio acumulado teórico siempre está por encima del promedio acumulado real, obteniendo un promedio diario teórico mayor que el promedio diario real. Se visualizan días donde la diferencia entre los promedios parece ser entre 5 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$, mientras que los últimos días la variación entre los promedios es más grande. La diferencia de estos últimos es debido a que el promedio acumulado real no muestra un comportamiento polinomial, por ejemplo, se observa que en el domingo solo va decayendo la curva hasta llegar a su promedio diario, obteniendo así, un promedio mucho más bajo de lo que demuestra el teórico.

Los días sábado y domingo a medida que pasan las horas sus promedios acumulados iban disminuyendo, con una variación redondeada de -1. Por lo que, para este estilo de comportamiento es mejor utilizar otra ecuación polinomial de grado 2 como base. Realizando las modificaciones se obtiene los siguientes gráficos:

Tabla 30: Promedio acumulado del MP2.5 teórico nuevo vs el real.

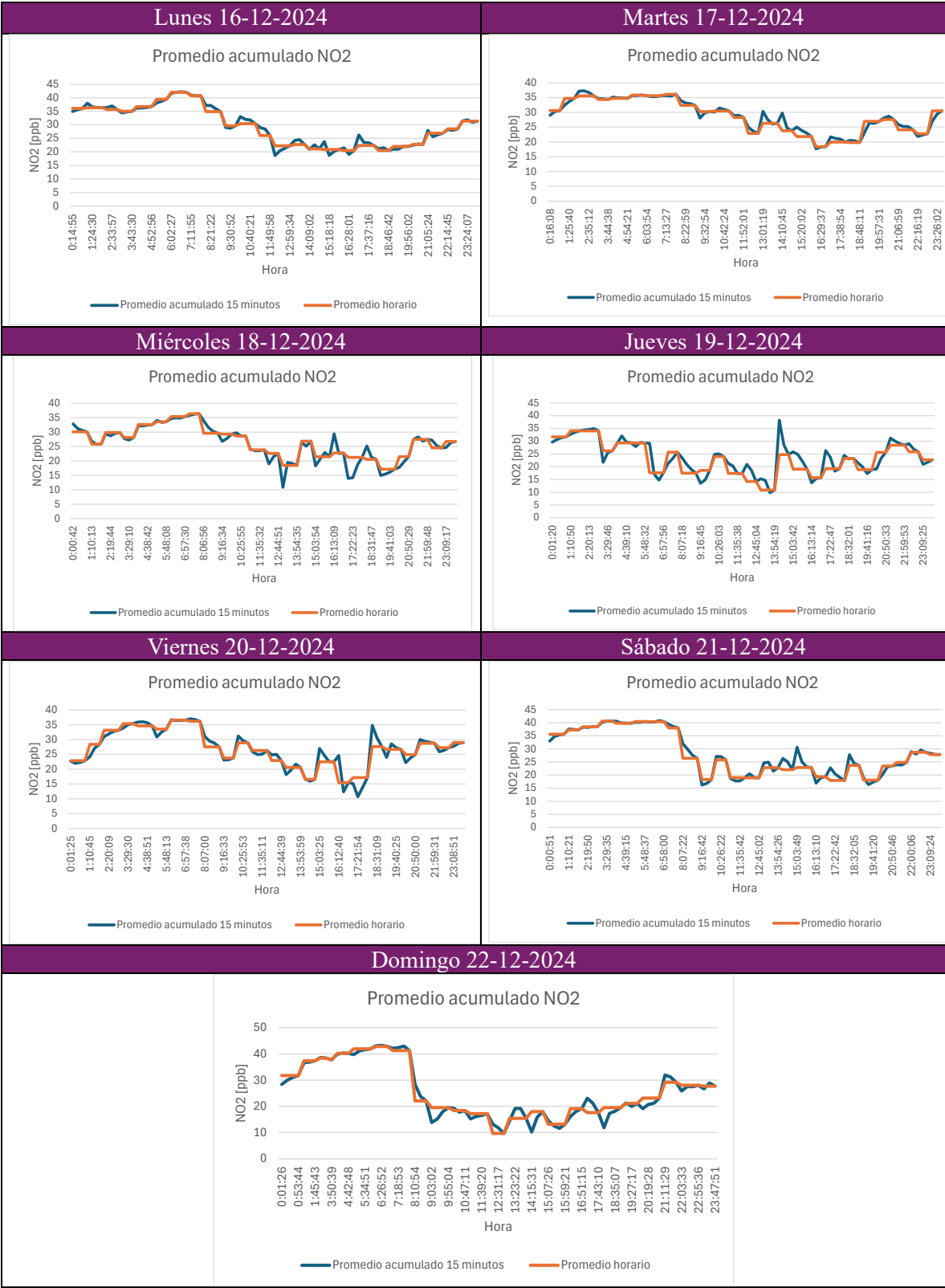


De la Tabla 30 se observa como la nueva curva de promedio acumulado se asemeja de mejor forma a las curvas reales generadas, obteniendo un valor del promedio diario mucho más cercano.

4.3.4. Análisis de los promedios acumulados del NO_2

El plan de monitoreo propone presentar los promedios acumulados dentro de una hora del NO_2 , ya que permite al usuario saber cómo está la calidad de aire en tiempo real. Idealmente se espera que las mediciones sean cada 15 minutos y que, por ende, dentro de una hora se generen 4 mediciones, sin embargo, el sensor Clarity presenta concentraciones desfasadas y a veces se realizan solo 3 mediciones dentro de una hora. Es importante señalar esto, ya que puede afectar al promedio acumulado final, dando resultados erróneos. A continuación, se presentan las curvas obtenidas por día del promedio acumulado de cada 15 minutos.

Tabla 31: Promedio acumulado de 15 minutos del NO₂ vs el promedio horario.



Analizando los gráficos de la Tabla 31 se observa que el promedio acumulado presenta el mismo patrón de comportamiento que el promedio horario, habiendo muy pocos casos donde el acumulado sobrepasa al promedio horario. Casos más notorios como el jueves, donde el promedio acumulado alcanza casi los 40 [ppb] mientras que su promedio horario es de 25 [ppb], sin embargo, después de 15 minutos el valor empieza a disminuir a aproximadamente 28 [ppb] teniendo un valor más cercano al promedio horario. También se alcanza a apreciar que ningún promedio acumulado logra sobrepasar los 106 [ppb], y, por ende, su promedio horario tampoco logra obtener dicho valor, por lo tanto, ambos valores respetan la norma establecida por hora del NO₂, indicando una buena calidad de aire.

4.3.5. Evaluación de las predicciones de curva

Se realiza una tabla con el porcentaje de error que presentan las curvas teóricas con las reales del MP2.5 con el fin de contemplar cuanta precisión posee las ecuaciones polinomiales propuestas.

Tabla 32: Porcentaje de error entre el promedio acumulado real y el teórico del MP2.5

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Promedio acumulado teórico	16,63	20,09	18,14	18,44	35,11	21,83	24,58
Promedio acumulado real	13,01	12,78	13,73	14,78	22,77	22,10	23,80
Error	22%	36%	24%	20%	35%	-1%	3%

Se puede apreciar en la Tabla 32 que el porcentaje de error que entrega la recta polinomial es entre 20 a 36% siendo una diferencia relativamente alta entre los promedios, sin embargo, ninguno de los valores indica que la calidad del aire esta por sobre la norma establecida, siendo todas menores a 50 [µg/m³], indicando que todos los días de la semana estudiada hay una buena calidad de aire. Los últimos valores que se han realizado con otra recta polinomial obtuvieron un porcentaje muy bajo de error siendo los más cercano a lo que se podía presentar en el promedio diario.

Tabla 33: Error del promedio acumulado de 15 minutos con el promedio horario del NO₂ del jueves.

Fecha / hora	Error	Fecha / hora	Error	Fecha / hora	Error	Fecha / hora	Error
19-12-2024 0:01	-7%	19-12-2024 6:05	40%	19-12-2024 12:10	32%	19-12-2024 18:14	5%
19-12-2024 0:18	-3%	19-12-2024 6:23	-3%	19-12-2024 12:27	24%	19-12-2024 18:32	-1%
19-12-2024 0:36	-1%	19-12-2024 6:40	-19%	19-12-2024 12:45	0%	19-12-2024 18:49	0%
19-12-2024 0:53	0%	19-12-2024 6:57	0%	19-12-2024 13:02	29%	19-12-2024 19:06	13%
19-12-2024 1:10	-4%	19-12-2024 7:15	-21%	19-12-2024 13:19	26%	19-12-2024 19:23	5%
19-12-2024 1:28	-2%	19-12-2024 7:32	-11%	19-12-2024 13:37	-11%	19-12-2024 19:41	-9%
19-12-2024 1:45	0%	19-12-2024 7:49	0%	19-12-2024 13:54	0%	19-12-2024 19:58	0%
19-12-2024 2:02	1%	19-12-2024 8:07	26%	19-12-2024 14:11	35%	19-12-2024 20:15	-34%
19-12-2024 2:20	2%	19-12-2024 8:24	16%	19-12-2024 14:29	13%	19-12-2024 20:33	-10%
19-12-2024 2:37	3%	19-12-2024 8:41	8%	19-12-2024 14:46	0%	19-12-2024 20:50	0%
19-12-2024 2:54	0%	19-12-2024 8:59	0%	19-12-2024 15:03	26%	19-12-2024 21:07	9%
19-12-2024 3:12	-21%	19-12-2024 9:16	-38%	19-12-2024 15:21	23%	19-12-2024 21:25	5%
19-12-2024 3:29	-3%	19-12-2024 9:34	-25%	19-12-2024 15:38	14%	19-12-2024 21:42	2%
19-12-2024 3:47	0%	19-12-2024 9:51	0%	19-12-2024 15:55	0%	19-12-2024 21:59	0%
19-12-2024 4:04	-1%	19-12-2024 10:08	4%	19-12-2024 16:13	-15%	19-12-2024 22:17	11%
19-12-2024 4:21	9%	19-12-2024 10:26	4%	19-12-2024 16:30	-2%	19-12-2024 22:34	4%
19-12-2024 4:39	1%	19-12-2024 10:43	0%	19-12-2024 16:48	0%	19-12-2024 22:51	0%
19-12-2024 4:56	0%	19-12-2024 11:00	18%	19-12-2024 17:05	27%	19-12-2024 23:09	-9%
19-12-2024 5:13	-5%	19-12-2024 11:18	15%	19-12-2024 17:22	19%	19-12-2024 23:26	-5%
19-12-2024 5:31	1%	19-12-2024 11:35	0%	19-12-2024 17:40	-5%	19-12-2024 23:44	0%
19-12-2024 5:48	0%	19-12-2024 11:52	0%	19-12-2024 17:57	0%		

La Tabla 33 muestra el porcentaje de error del promedio acumulado de 15 minutos con respecto al promedio horario del jueves, ya que se utiliza como día representativo por su cantidad de valores que sobrepasan el promedio horario, para ver los errores de los otros días diríjase al Anexo B.

Analizando la Tabla 33 se observa que aquellos valores con más de 20% error se realiza cuando hay un cambio de hora, esto explica porque varía tanto los promedios, ya que se espera que al inicio de una hora el valor sea más alto y luego este se disipe hasta llegar al valor del promedio horario. A pesar de esto se observa muchos rangos de hora donde el porcentaje es menor al 15%, indicando que el comportamiento del promedio acumulado puede llegar a ser bastante parecido al comportamiento del promedio horario.

4.3.6. Conclusión del plan de monitoreo

En consecuencia, de los errores obtenidos tanto del análisis del MP2.5 y del NO₂, la predicción del MP2.5 logra alcanzar un error de hasta el 35%, siendo no un error bajo, ya que indica un promedio final mayor al que realmente es, sin embargo, ninguna de estas predicciones logra superar los 50 [µg/m³] por lo que sirve como para tener una idea de cómo se comportará el material particulado. Mediante las variaciones vistas por este, observar que si el MP2.5 aumenta con una diferencia de 1 entonces indica una curva polinomial de grado 2, mientras que si se ve desde un inicio que el MP2.5 empieza con variaciones negativas, es muy probable que la curva empezará a descender obteniendo otra curva polinomial de grado 2, la cual al momento de ponerla a prueba logro ser la más acertada al promedio final logrando errores del -1 o 3%.

Por otra parte, el NO₂, presenta en su mayoría errores más bajos, indicando que el promedio acumulado cada 15 minutos se acerca al promedio horario actual, siendo un buen indicativo para utilizarlo en el plan de monitoreo y compararlo con la norma chilena.

5. Capítulo 5. Conclusiones

5.1. Conclusiones generales

La metodología propuesta permite monitorear los contaminantes MP2.5 y NO₂ mediante el uso de sensores de calidad del aire, los cuales registran y reportan las mediciones obtenidas en periodos de tiempo predefinidos.

Se destaca el impacto negativo que la exposición a estos contaminantes puede tener en la población, especialmente considerando que fuentes como el transporte público generan altas emisiones de dichos contaminantes. Este problema es particularmente preocupante para quienes realizan actividad física, ya que están más expuestos a enfermedades respiratorias y cardiovasculares derivadas de la contaminación.

Existen redes públicas como el SINCA que entregan información de las concentraciones de los contaminantes presentes a lo largo del país, permitiendo observar si la calidad del aire está dentro de los límites establecidos por la norma chilena. Sin embargo, su información es muy general y no permite visualizar de forma más detallada los contaminantes presentes dentro de las comunas, siendo que su concentración puede variar entre las calles de una misma comuna, esto asociado al flujo vehicular presente. Además, existe una falta de medición de calidad de aire presentes en algunas comunas, donde no se puede obtener acceso a lo mencionado, generando limitaciones en los usuarios interesados en conocer las condiciones presentes de su entorno.

Se presentan dispositivos de calidad de aire como solución inicial para el plan de monitoreo, con el fin de integrarlos en las redes presentes. Las diversas tecnologías de estos sensores y comprender su uso es importante para realizar las exigencias necesarias para su obtención, comprendiendo además las desventajas que puede presentar con respecto a la entrega de datos medidos.

Mediante el estudio de los sensores presentes en el mercado se obtiene los posibles candidatos para integrarlo al plan de monitoreo, siendo los criterios de selección un factor clave para la segregación de dispositivos. Exigir que el sensor cumpla con una calibración base, permite asegurar una toma de datos coherente y realista dentro del entorno estudiado. Además, de seleccionar un dispositivo que sea resistente al entorno que estará sometido y evitar que pueda entregar datos erróneos o en su defecto, su mal funcionamiento.

El dispositivo Clarity cumple con los requerimientos solicitados indicando no solo ser el que mejores condiciones operativas y compatibilidad presenta, sino también indica el menor costo para su obtención, considerando la gran cantidad que se necesita para su integración en 150 puntos del Gran Santiago.

Los análisis del comportamiento de los contaminantes mencionados permitieron comprender el contexto al cual los transeúntes estaban implicados, entender la tendencia y patrón que genera cada uno en las distintas zonas estudiadas, permite observar el diagnóstico preliminar de la calidad de aire presente de la Región Metropolitana, donde dentro de las normas chilenas es buena. Encontrar un patrón indica que es posible generar una predicción de la curva, siendo una herramienta útil para las acciones que se deben implementar en casos donde se exceda el límite normativo.

En base a lo mencionado anteriormente se logra asignar datos de las mediciones de los sensores a diversos tipos de usuarios para su presentación y generar acotaciones con respecto a la cantidad de información útil para cada uno, utilizando además indicadores cualitativos para una mayor

compresión del significado de dichos datos y lo que implica para la calidad del aire presente, logrando estructurar un plan de monitoreo.

La validación llevada a cabo permite conocer las falencias que presentan tanto el dispositivo USM como el sensor Clarity con respecto a sus mediciones, indicando una alta sensibilidad en el entorno a los cuales están sometidos, esto implicaría, realizar una mejora en la calibración de dichos dispositivos para que sean lo más acertados y cercanos posibles a la medición del sensor de referencia SINCA o también un rediseño de los dispositivos para resistir a los cambios de temperatura o humedad relativa que se pueden presentar en el país.

Por otra parte, la validación del plan de monitoreo coincide con lo esperado, siendo que el promedio acumulado del MP2.5 logra generar una cercanía al promedio diario final del día, a parte, se esperaba que la predicción de la curva fuera mayor al promedio diario, debido a que el modelo propuesto sigue un comportamiento ideal. Por otra parte, con respecto al NO₂ la curva generada por el promedio acumulado de 15 minutos logra representar el promedio horario final. Lo anterior indica que el plan de monitoreo propuesto puede ser utilizado para su propósito, sin embargo, requiere unas mejoras para un pronóstico aún más acertado.

5.2. Conclusiones específicas

En conclusión, el sensor Clarity logra ser un dispositivo con herramientas completas capaz de superar los criterios de selección establecidos, indicando un buen nivel de calibración con respecto a su coeficiente de determinación teniendo valores para el MP2.5 muy cercanos a 1, esto no implica que el NO₂ tenga un R² bajo, todo lo contrario, su coeficiente es muy cercano al solicitado por lo que se sigue considerando que el sensor posee una muy buena precisión con respecto a los datos entregados. Adicionalmente, los flujos de datos se adaptan muy bien al contexto chileno, ya que permite conectividades que pueden funcionar en diversas condiciones a la que puede estar sometido el dispositivo. Por otra parte, el tipo de resistencia que promete Clarity es compatible con los cambios climáticos que se desarrollan en la Región Metropolitana, indicando un buen funcionamiento de forma constante hasta la fecha de su mantenimiento. Además, al tener integrado un panel solar permite que no haya pérdidas de datos con respecto a imprevistos tales como un corte de corriente eléctrica, permitiendo que la batería pueda realizar su funcionamiento.

A pesar de haber otros dispositivos que establecían rangos de medición mayores a Clarity o incluso una mejor calibración, un factor importante fue el costo asociado que llevaría la obtención de estos, donde Clarity resulta ser por mucho, más barato que los otros sensores y pudiendo cumplir con los requisitos iniciales de manera formidable. Sin embargo, al compararse con el precio del dispositivo USM, el costo de su arquitectura resulta ser menor que el dispositivo Clarity logrando ser una opción muy viable, ya que utiliza los mismos sensores que Clarity posee, siendo el diseño del dispositivo y las herramientas que entrega una desventaja en comparación a Clarity. Aunque este no deja de ser una solución factible para la problemática de la cual está diseñada. Ya que este a diferencia de los otros sensores, cuenta con una cámara que permite el conteo vehicular, permitiendo poder analizar la relevancia del flujo vehicular con respecto a las concentraciones de contaminantes presentes en el ambiente.

Con respecto al material particulado 2.5 en zonas donde concurre una cantidad baja de vehículos, obtiene promedios diarios por debajo de los 50 [µg/m³] implicando que la calidad de aire presente en la zona es buena y no llega a afectar el estado de salud de los residentes. Además, si bien no hay horarios consistentes a la hora de ver el aumento del MP2.5, este en lo general aumenta en la tarde y logra reducirse en las noches. Esto puede ser debido al horario de trabajo de los residentes, donde la

mayoría sale en sus vehículos alrededor de las 7 u 8 de la mañana y luego vuelve en la tarde. Tomar en cuenta que la zona de residencia tiene muchas casas en su alrededor lo que lo hace más cerrado y generando que las partículas queden suspendidas en el aire. Se observa también que la mayoría del promedio acumulado del MP2.5 tiene un comportamiento polinomial de grado 2, esto puede permitir predecir cuanto sería el promedio máximo que se puede esperar del MP2.5 en estas zonas y contemplar desde antes la calidad de aire a la cual va a estar sometido el ambiente, esto sí, que no se presente condiciones externas que pueda alterar el comportamiento del MP2.5.

En relación con el NO₂, el mayor promedio horario que logró alcanzar durante las 4 semanas es de 53 [ppb], estando dentro de las normas establecidas. Se observa también que las mayores variaciones que se obtiene al medir cada 15 minutos son de -1 a 1 [ppb], esto indica que no hay mayores cambios en el NO₂, incluso aquellos valores que varían más de 10 [ppb] a los 15 minutos bajan, no generando mayor cambio en el promedio horario. Aquellos promedios horarios altos que se detectan se generan alrededor de las 07:00 a 11:00 de la mañana, la cual estaría relacionada con la salida de vehículos del lugar residencial. Después de estas horas el NO₂ tiende a disminuir por lo que ayuda a reducir el promedio diario. Se puede concluir de la zona que esta presenta una buena calidad de aire tanto para MP2.5 como para NO₂, teniendo bajos promedios que respetan la norma establecida chilena.

Con respecto a lo que se esperaba de la zona industrial, es decir, que presentara altos niveles de MP2.5 como de NO₂. No fue así el caso, empezando por el material particulado, este presentó durante las 2 semanas promedios diarios más bajos de lo que se esperaría, siendo un muy buen resultado para la calidad de aire presente. Los valores no presentaban algún patrón en específico, ya que, al ser una zona muy cercana a la calle, es muy variable la cantidad de vehículos que pueden transitar por ahí, aunque se puede observar, por ejemplo, en el caso del promedio acumulado que el promedio aumenta desde la madrugada. Con relación al comportamiento que presenta el promedio acumulado, se observa que tiene la intención de realizar un comportamiento polinomial de grado 2, aunque haya excepciones que generan un compartimiento lineal con pendiente negativa, sin embargo, si se utilizará la predicción con un modelo polinomial se obtendría un valor de promedio máximo al que tendría el día, siendo lo más probable, que su promedio este dentro de los límites de la normativa chilena.

Del NO₂ se observa que el comportamiento de su promedio diario es casi constante resultando aproximadamente de 29 [ppb]. Además, este no presenta mayores variaciones de medición cada 15 minutos siendo el [-1 a 1] la diferencia con más ocurrencia. Por otra parte, el mayor valor que logra alcanzar el NO₂ en 15 minutos es de 45 [ppb], siendo un valor que no logra que el promedio horario llegue a más 106 [ppb]. Esto indica un buen control del NO₂ por las calles y se puede concluir que la zona industrial es un lugar con buena calidad de aire para la salud de los transeúntes.

Los dispositivos analizados anteriormente muestran una gran diferencia de la toma de datos que realizan, afectando los promedios diarios finales de cada contaminante, donde sensores como el Clarity llega a obtener promedios diarios que superan la norma chilena para una buena calidad de aire. Realizando una fijación en los otros dos dispositivos estos indican que en ningún momento de la semana el material particulado logra superar los 50 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] impuesta por la norma. Si se guía por el dispositivo Clarity, este indica que la calidad de aire donde el flujo vehicular es muy reducido puede pasar de ser buena a regular. Mientras que los otros dispositivos indican que el promedio diario no logra sobrepasar los 50 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] y, por ende, la calidad de aire de todas las semanas ha sido buenas. Este último tiene más coherencia con el supuesto que uno tiene con respecto a lo bajo o nulo tránsito de vehículos. Recapitulando con el material particulado, el comportamiento que este presenta con su promedio acumulado indica que se puede comparar a una curva polinomial de grado 2, permitiendo predecir un valor máximo de promedio diario final que puede indicar el dispositivo. Aunque es claro,

que se presentaran excepciones donde la curva se asemejará a un comportamiento lineal, por lo que se tendría que analizar en su momento que tanto va aumentando o disminuyendo al pasar las horas.

Con respecto a las mediciones del NO_2 se observa que el dispositivo de SINCA es el que logra medir mayores concentraciones de forma horaria y, por ende, tiene mayores promedios diarios sin embargo estos no logran sobrepasar los límites de la norma chilena. En segundo lugar, se tiene el sensor Clarity que logra medir concentraciones parecidas al SINCA, aunque este tiene disminuciones abruptas en su gráfico hasta lograr concentraciones horarias negativas, esto influye en el promedio diario del NO_2 logrando promedios más bajos. Y por último se tiene el prototipo USM que presenta valores muy bajos del NO_2 , lo cual es lo que uno supondría por el muy bajo flujo vehicular presente en el ambiente, logrando que pueda posicionarse por debajo de las normas de la OMS. En relación con las variaciones que se producen del NO_2 , en ninguno de los dispositivos se presentan grandes variaciones al pasar los minutos, siendo la más frecuente el rango [-1 a 1].

Comparando los tres dispositivos se observa un comportamiento donde el Clarity mide valores por sobre el prototipo USM tanto en el $\text{MP}_{2.5}$ como en el NO_2 , estando estos por sobre o debajo de las mediciones SINCA. Por otra parte, si no se considera el Clarity dentro de los gráficos, se puede decir que tanto el SINCA como el USM indican que la zona presenta una buena calidad del aire, mientras si se considera el Clarity se obtiene otro tipo de calidad de aire pudiendo pasar de buena a regular, habiendo una incongruencia con los otros dispositivos.

De acuerdo con los análisis de los datos de las zonas anteriores, se concluye que los promedios diarios del $\text{MP}_{2.5}$ obtenidos entre las distintas zonas son bastantes parecidos entre sí, entrando en un rango de 8 a 30 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] (esto sin considerar las mediciones realizadas por Clarity en el Parque O'Higgins), indicando que la calidad de aire presente en diversas zonas de la Región Metropolitana es buena y está dentro de las normas establecidas. Además, al generar una curva del promedio acumulado horario del $\text{MP}_{2.5}$ se observa un patrón de comportamiento similares entre sí, asemejándose a un comportamiento polinomial de grado 2. Dicha curva permitirá predecir la calidad de aire que puede presentarse en el día, aunque hay excepciones de curvas que no logran la forma dicha, con esto se considera observar como la curva se va formando a través de las horas para seleccionar el tipo de modelo a utilizar para la predicción en su momento. Una forma factible sería ver las variaciones que se producen del promedio acumulado actual con el promedio acumulado anterior, y ver si este tiene valores positivos, negativos o nulos. Para lograr esto, se debe redondear los valores y por lo menos visualizar que existan 3 valores consecutivos positivos para asumir que se generará la curva polinomial, una vez que la diferencia de valores sea 0 esto indicaría que la curva empezará a disminuir.

En relación con el NO_2 , se concluye que los promedios diarios de las tres zonas están dentro de los límites establecidos por la norma chilena, donde en ninguna zona se logra superar los 35 [ppb] por lo que se observa un buen control del NO_2 en la Región Metropolitana, siendo zonas que permite al transeúnte realizar actividades físicas. Con respecto a las variaciones que se presentaron durante cada 15 minutos o 1 minuto, se observa que no se genera mucha diferencia de un valor a otro, por lo que sería factible presentar los promedios acumulados dentro de una hora, tomando los valores de cada 15 minutos ya que no influiría mucho el cambio del promedio horario.

La organización de datos presentada permite a los usuarios acceder a los datos más importantes de acuerdo con su interés y especialización. Empleando los valores que se obtuvieron del análisis de la sección anterior y como estos pueden llegar a ser una buena representación para compararlo con las normas vigentes. El indicador permite comprender los niveles de emergencia al cual el usuario está sometido si se está expuesto al aire presente, dando además recomendaciones de las actividades que

puede llegar a hacer. Para evitar que haya malinterpretaciones de los datos, se concluye no presentar al público las concentraciones que están presentes en los indicadores anteriores, esto con el fin de evitar comparaciones o confusiones con los datos entregados por SINCA y permitir que haya coherencia de las informaciones entregadas.

Por otra parte, la organización de datos presente no considera como enfrentarse al fenómeno “drift”, el cual son los cambios graduales que puede presentar un sensor a lo largo del tiempo, causando discrepancia con respecto a lo que se está midiendo, presentando un riesgo al entregar datos erróneos al usuario y que este decida sus acciones en base a estos.

El dispositivo USM logra mostrar una buena calibración con respecto al MP2.5 debido a su coeficiente de determinación R^2 , por otro lado, en las mediciones del NO_2 no es muy acertado, ya que tiene un R^2 de 0,57 muy alejado de llegar a 1. En consecuencia, se explica su valor por la humedad relativa presente en el ambiente, en ese caso, sería recomendable rediseñar la estructura donde está ubicado el sensor. Arreglar la calibración del dispositivo USM lograría demostrar ser competitivo para el dispositivo Clarity.

Con respecto al dispositivo Clarity este demuestra un comportamiento lejano al del dispositivo SINCA el cual es utilizado como base, llegando a tener el triple de valores de los reportados en el dispositivo de referencia. A pesar de esto Clarity indica un patrón semejante, por lo cual esto indica que factores externos pudieron afectar la medición de los contaminantes. Es importante detectar el factor principal de su des calibración, ya que sus reportes podrían indicar otra calidad de aire que no representa la realidad.

A pesar de los valores mostrados por ambos dispositivos y el comportamiento presentado durante sus mediciones, no implica que no deban ser utilizados para su operación. La sensibilidad con la que operan los sensores provoca que sus valores sean más altos, sin embargo, la recalibración de los dispositivos permitiría su buena operación y entrega de datos.

En consecuencia, de los errores obtenidos tanto del análisis del MP2.5 y del NO_2 , la predicción del MP2,5 logra alcanzar un error de hasta el 35%, siendo no un error bajo, ya que indica un promedio final mayor al que realmente es, sin embargo, ninguna de estas predicciones logra superar los 50 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ por lo que sirve como para tener una idea de cómo se comportará el material particulado. Mediante las variaciones vistas por este, observar que si el MP2.5 aumenta con una diferencia de 1 entonces indica una curva polinomial de grado 2, mientras que si se ve desde un inicio que el MP2.5 empieza con variaciones negativas, es muy probable que la curva empezará a descender obteniendo otra curva polinomial de grado 2, la cual al momento de ponerla a prueba logro ser la más acertada al promedio final logrando errores del -1 o 3%.

Por otra parte, el NO_2 , presenta en su mayoría errores más bajos, indicando que el promedio acumulado cada 15 minutos se acerca al promedio horario actual, siendo un buen indicativo para utilizarlo en el plan de monitoreo y compararlo con la norma chilena.

5.3. Recomendaciones

Del análisis de datos, se propone analizar otras estaciones del año, en especial, monitorear en épocas de invierno, ya que es importante conocer el comportamiento de los contaminantes en las fechas donde hay más contaminación y se presentan niveles de emergencias altas. Se espera que, en invierno, los valores de las concentraciones sean mucho más altas y variables con el tiempo. A pesar de eso, recomendaría realizar el promedio acumulado tanto del MP2.5 como del NO_2 para visualizar si el

comportamiento de la curva se sigue presentando de manera polinomial de grado 2. Y observar si las concentraciones logran disminuir su a medida que pasa el tiempo o si se mantienen durante los días.

De la organización de datos se recomienda proponer soluciones cuando se provoque un drift en el sensor, para poder detectar aquellos sensores que estén entregando información equivocada. Se propone mediante el estudio del comportamiento de los contaminantes analizar en un cierto periodo de tiempo el comportamiento “normal” de estos y de cuando se presente alguna anomalía. Observar si durante el tiempo las mediciones empiezan a disminuir constantemente, eso indicaría que el sensor de calidad está empezando a obtener valores fuera de lo típico y permitiría al usuario reconocer cuando el sensor está empezando a desgastarse, dando como solución la mantención de este o su reemplazo por otro dispositivo.

En relación con la predicción de la curva del material particulado 2.5, a pesar de que se modela una recta que fuera una base para las demás mediciones esta no logra predecir en su totalidad el promedio diario final, ya que realiza promedios por encima del real. Por lo que se recomienda realizar otro modelo que siga siendo de forma polinomial, pero que sea aún más acertada con la curva que se vaya a generar durante el día. Después de esto, realizar una validación de la nueva ecuación de la recta que cumpla con los días a probar. Tomar en cuenta, que no siempre se realiza una curva tan pronunciada como sería idealmente, y que ocurren casos en el que el polinomio se compone de una sola pendiente la cual puede aumentar continuamente o disminuir. Por lo que se insiste en generar otras rectas que puedan satisfacer todos los casos que puedan presentarse, siendo principalmente los mencionados anteriormente.

Por último, se recomienda rediseñar el prototipo USM, el coeficiente de determinación R^2 que presenta con respecto al NO_2 es muy bajo, es importante tener en cuenta el entorno al que está sometido los sensores y la sensibilidad que estos pueden presentar. Un diseño más robusto o que tenga otro tipo de carcasa puede generar una mejora en su calibración. Además, sería útil analizar el dispositivo dentro de un ambiente controlado para observar en qué momento empieza su desviación de datos. Otra solución puede ser generar algoritmos que ajusten la lectura de las mediciones en base a otro dispositivo. Por otra parte, se recomienda cambiar la frecuencia de toma de datos del dispositivo, ya que no se observa mayores variaciones en cada minuto. La autora considera que medir cada 15 minutos es apropiado, ya que las variaciones son más notables en dicho intervalo.

Bibliografía

1. Dictuc. (Dic, 2023). “Inventario de emisiones sector transporte en la región metropolitana”. https://airerm.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2024/03/2023_Inventario-Transporte.pdf
2. RETC. (2021). “Informe Consolidado de emisiones y transferencias de contaminantes” <https://retc.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2023/12/Informe-Consolidado-de-Emisiones-y-Transferencias-de-Contaminantes-del-RETC-2021.pdf>
3. Oscar Díaz, Néstor Rojas, Alba Rodríguez. (2018). “Evaluación de la exposición de ciclistas a la contaminación del aire” <https://www.scielo.org/pdf/rsap/2018.v20n6/764-770/es>
4. Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire. <https://sinca.mma.gob.cl/>
5. GAO. (marzo, 2024). “Air Quality sensors” <https://www.gao.gov/assets/d24106393.pdf>
6. EGUsphere. (8 abril, 2024). “An overview of outdoor low-cost gas-phase air quality sensor deployments: current efforts, trends, and limitations” <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2024/egusphere-2024-1004/egusphere-2024-1004.pdf>
7. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (s. f.). Clima de la Región Metropolitana. <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region13/clima.htm>
8. Climate-Data. (s. f.). Clima: Santiago. <https://es.climate-data.org/america-del-sur/chile/region-metropolitana-de-santiago/santiago-938/>
9. European Environment Agency (EEA) (2022). Europe's air quality status 2022 - World Health Organization (WHO) air quality guidelines. EEA. <https://www.eea.europa.eu/publications/status-of-air-quality-in-Europe-2022/europes-air-quality-status-2022/world-health-organization-who-air>
10. Ministerio del Medio Ambiente (MMA) (s.f.). Norma primaria de calidad del aire para dióxido de nitrógeno (NO₂). Gobierno de Chile. <https://normasaire.mma.gob.cl/nambientales/normas-de-calidad-del-aire/norma-primaria-de-calidad-del-aire-para-dioxido-de-nitrogeno-no2/#>
11. Yatkin, S., Gerboles, M., Borowiak, A., & Signorini, M. (2022). Guidance on low-cost air quality sensor deployment for non-experts based on the AirSensEUR experience. European Commission.
12. Clarity (s.f.). Node-S Specifications Sheet. Clarity. <https://click.clarity.io/hubfs/Marketing%20Assets%20-%20PDFs/Product%20and%20Specification%20Sheets/Node-S%20Specifications%20Sheet.pdf>
13. Airly (2024). Airly Product Card Sensor 2024. Airly. https://airly.org/en/EN_AIRLY_Productcard_Sensor_2024.pdf
14. Airly (s.f.). Air Quality Sensors. Airly. <https://airly.org/en/features/air-quality-sensors/>
15. Airly (s.f.). Map. Airly. <https://airly.org/map/en/>
16. South Coast Air Quality Management District (AQMD) (2024). Summary of PM Criteria Pollutants. AQMD. <https://www.aqmd.gov/aq-spec/evaluations/criteria-pollutants/summary-pm>
17. South Coast Air Quality Management District (AQMD) (2024). Summary of Gas Criteria Pollutants. AQMD. <https://www.aqmd.gov/aq-spec/evaluations/criteria-pollutants/summary-gas>
18. Quant AQ (s.f.). Modulair Specification Sheet. Quant AQ. <https://assets.quant-aq.com/downloads/spec-sheets/modulair.latest.pdf>
19. Quant AQ (s.f.). Modulair Documentation. Quant AQ. <https://docs.quant-aq.com/modulair>

20. Bettair Cities (s.f.). Nodo Bettair. Bettair Cities. <https://bettaircities.com/es/nodo-bettair/>
21. Kunak Air (s.f.). Kunak AIR Datasheet. Kunak Air. https://kunakair.com/doc/External/Kunak_AIR_Datasheet_ES.pdf
22. AQMesh (s.f.). AQMesh - Productos. AQMesh. https://www.aqmesh.com/products/aqmesh/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAxKy5BhBbEiwAYiW---2jv4tD-CS72nMc71M6gp5sk0qR3WehT42TYY3-ncjIf22SYDbNPhoC9soQAvD_BwE
23. AQMesh (s.f.). AQMesh - Especificaciones Técnicas. AQMesh. https://www.aqmesh.com/products/technical-specification/?_gl=11nuyqvp_upMQ.._gaMzMyNTEwNzIyLjE3MzA5NDA2MTA.._ga_9BKLGI6MW7*MTczMDk1MjU4Mi4yLjAuMTczMDk1MjU4Mi4wLjAuMA..&gclid=CjwKCAiAxKy5BhBbEiwAYiW---2jv4tD-CS72nMc71M6gp5sk0qR3WehT42TYY3-ncjIf22SYDbNPhoC9soQAvD_BwE
24. Ellona (s.f.). WT1 Lite - Características del Producto. Ellona. <https://www.ellona.io/produit/wt1-lite-en/#caracteristiques-produits>
25. Ellona (2024). Datasheet WT1 Lite V040824 EN. Ellona. Recuperado de DATASHEET-WT1-LITE-V040824_EN_compressed.pdf
26. Prana Air (s.f.). Prana Sense - Monitoreo de Calidad del Aire. Prana Air. <https://www.pranaair.com/es/air-quality-monitor/ambient-air-monitor/prana-sense/#1687850067670-b7a2dd4b-7078>
27. Prana Air (s.f.). Monitoreo de Calidad del Aire - Ambient Air Monitor. Prana Air. <https://www.pranaair.com/es/air-quality-monitor/ambient-air-monitor/>
28. Prana Air (2024). Prana Air Ambient Lite Solar - Brochure. Prana Air. <https://www.pranaair.com/wp-content/uploads/2024/06/Prana-air-Ambient-Lite-Solar-brochure-.pdf>
29. Ekonet Solutions (s.f.). Monitoreo de calidad del aire. Ekonet Solutions. <https://ekonet.solutions/air-monitoring/>
30. Organización Mundial de la Salud. (2024, 24 de octubre). Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
31. Aperio. (s.f.). Sensor drift: What it is and how to address it. <https://aperio.ai/sensor-drift/>
32. Ministerio del Medio Ambiente de Chile (MMA). (n.d.). Guía MINSAL: Recomendaciones en gestión de episodios críticos (GEC). <https://airechile.mma.gob.cl/download/Guia-MINSAL-recomendaciones-en-GEC.pdf>
33. Osses, M., Loo Oyarzún, M.-I., y Diez, S. (2023). Producto 4, plan de monitoreo de contaminantes enfocado en la red de ciclovías, informe de avance.
34. Gálvez, N., Diez S, Jorquera I y Soto, M. (2024). Producto 5, pilotaje dispositivo IoT para monitoreo y centralización de información de Ciclovías Integración Productos 3 y 4.

Anexo

Anexo A: Gráficos de MP2.5 y NO₂

Anexo A.1: Zona de vivienda urbana

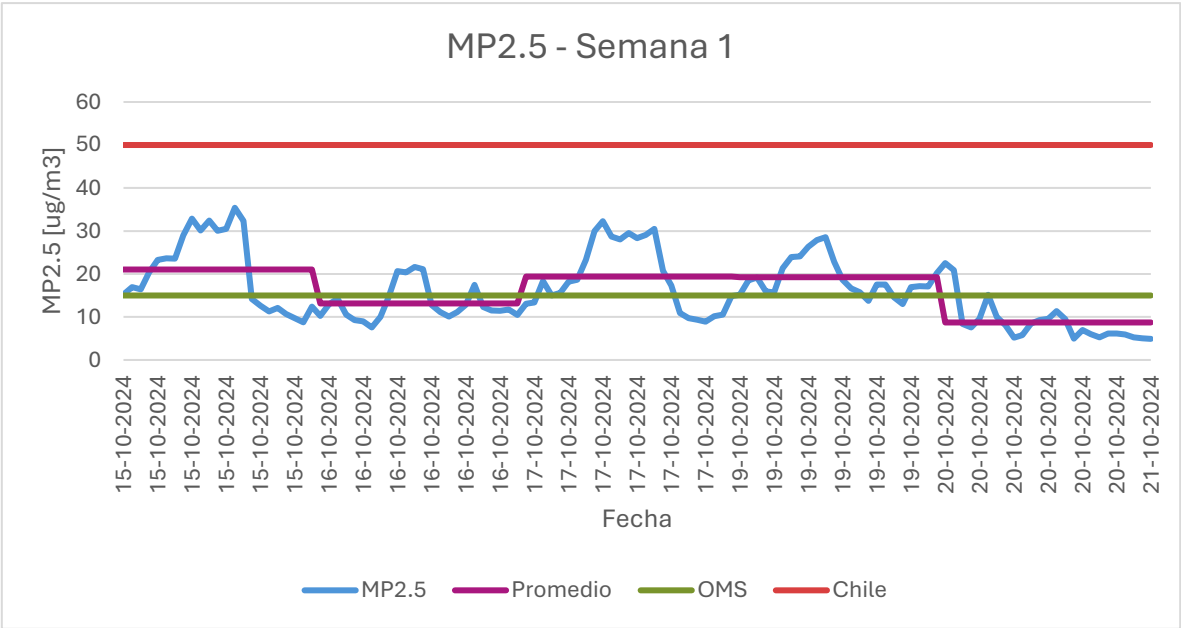


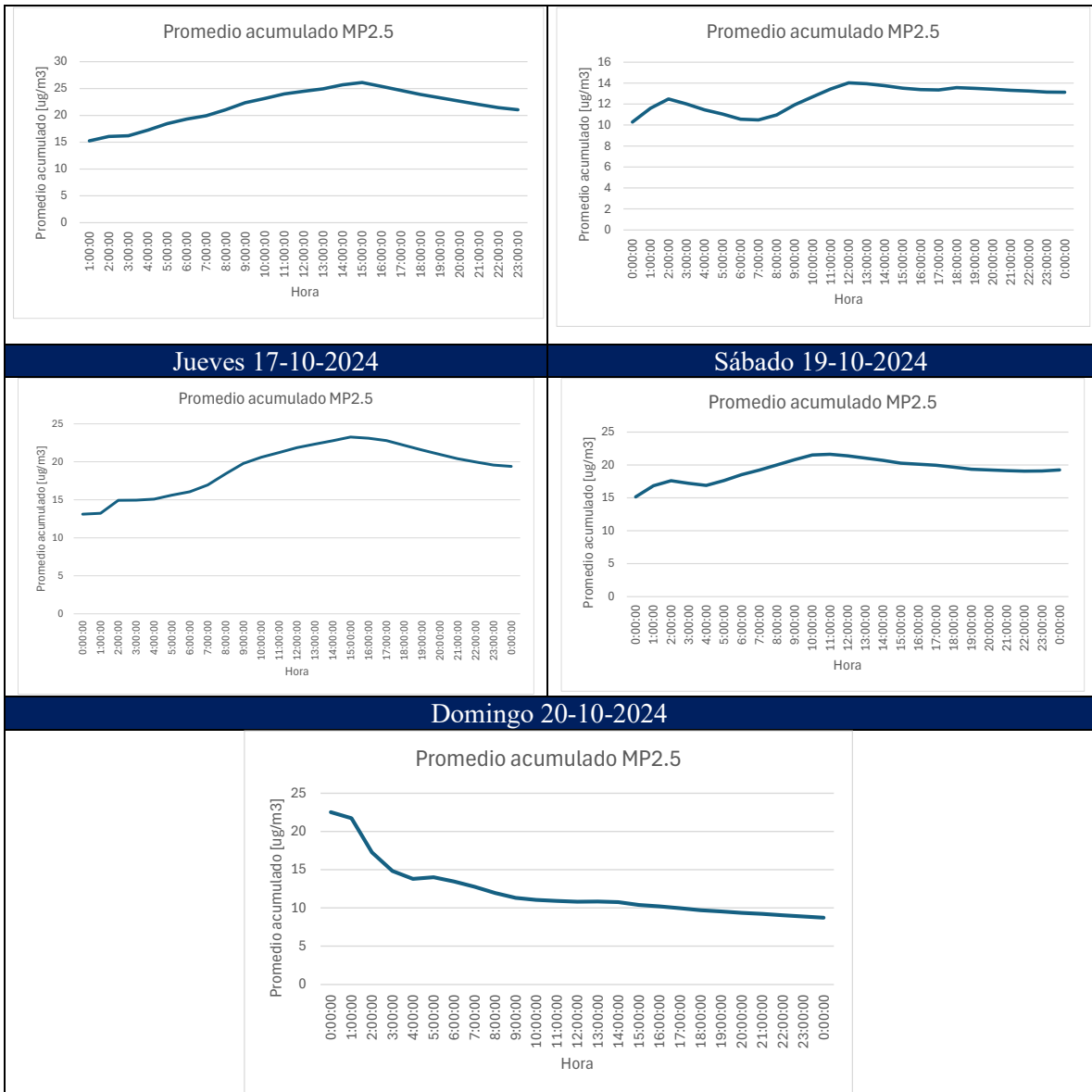
Gráfico 22: Datos del MP2,5 obtenidos en la Semana 1 con su promedio diario y los límites de promedio diario de la OMS y de las normativas chilenas.

Tabla 34: Datos específicos extraídos del gráfico generado del material particulado 2.5 de la Semana 1.

MP2,5	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Datos mayores al promedio	11	7	10	-	9	9
Horas	05:00 a 15:00	02:00 08:00 a 12:00 18:00	07:00 a 16:00	-	05:00 a 11:00 23:00 a 00:00	00:00 a 1:00 04:00 a 06:00 11:00 a 14:00
Promedio [µg/m³]	21,038	13,134	19,388	-	19,2332	8,7204

Tabla 35: Gráficos del promedio acumulado horario del MP2.5 de la Semana 1.

Martes 15-10-2024	Miércoles 16-10-2024
-------------------	----------------------



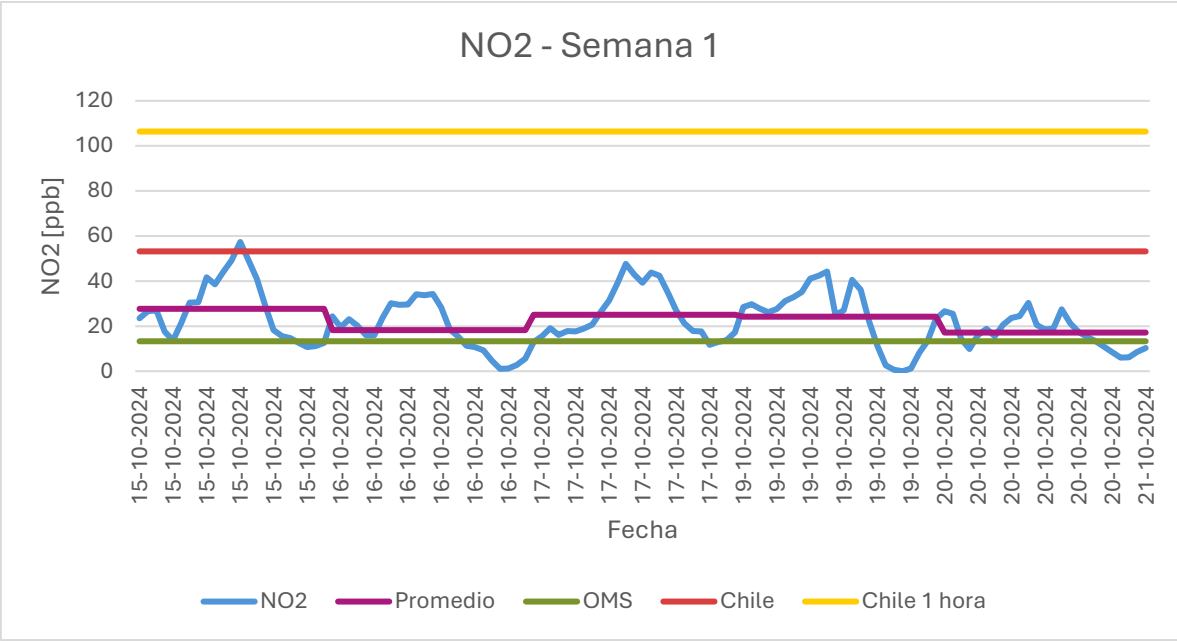
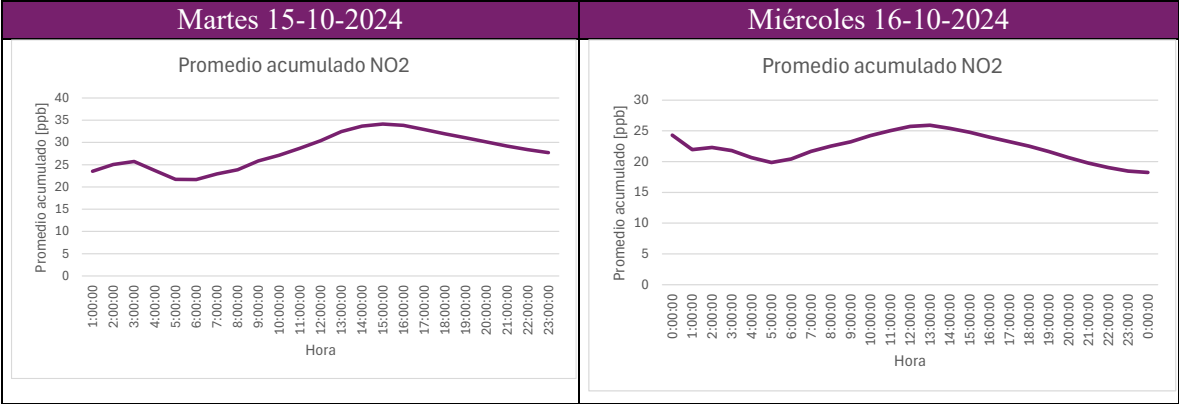


Gráfico 23: Datos por hora del NO₂ obtenidos en la Semana 1 con su promedio diario y los límites de promedio horario y diario de la OMS y de las normativas chilenas.

Tabla 36: Datos específicos extraídos del gráfico generado del dióxido de nitrógeno de la Semana 1.

NO ₂	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Datos mayores al promedio	10	13	10	-	16	13
Horas	07:00 a 16:00	00:00 a 03:00 06:00 a 14:00	08:00 a 17:00	-	00:00 a 14:00	00:00 a 1:00 05:00 07:00 a 16:00
Promedio [ppb]	27,692	18,246	25,033	-	24,169	17,144

Tabla 37: Gráficos del promedio acumulado horario del NO₂ de la Semana 1.



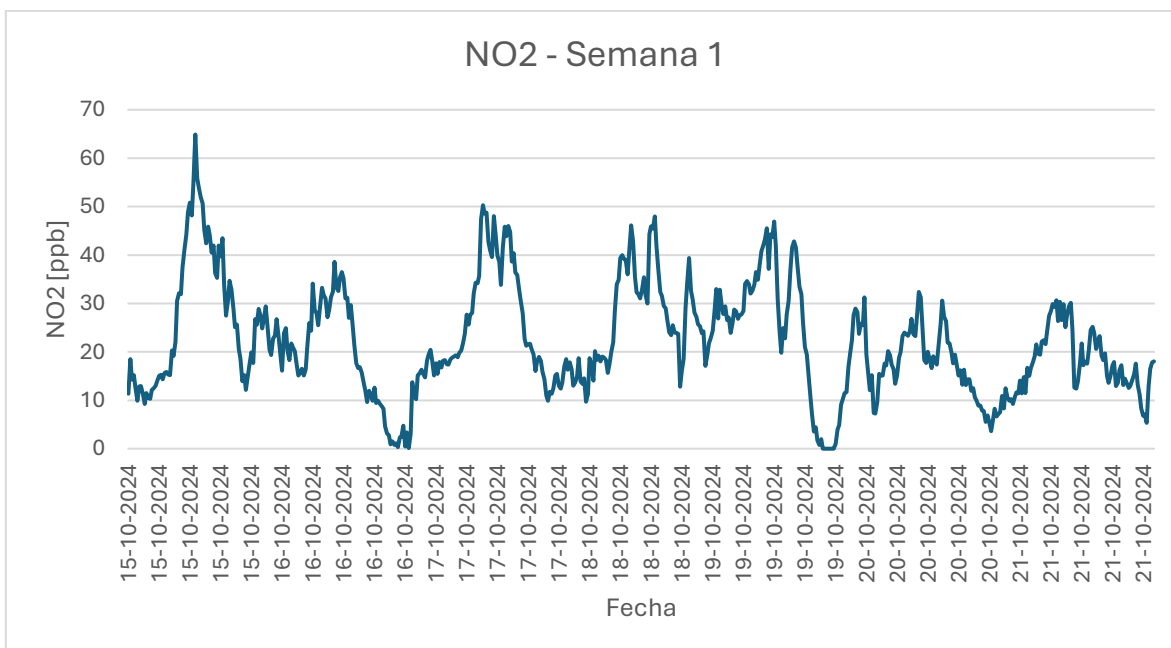
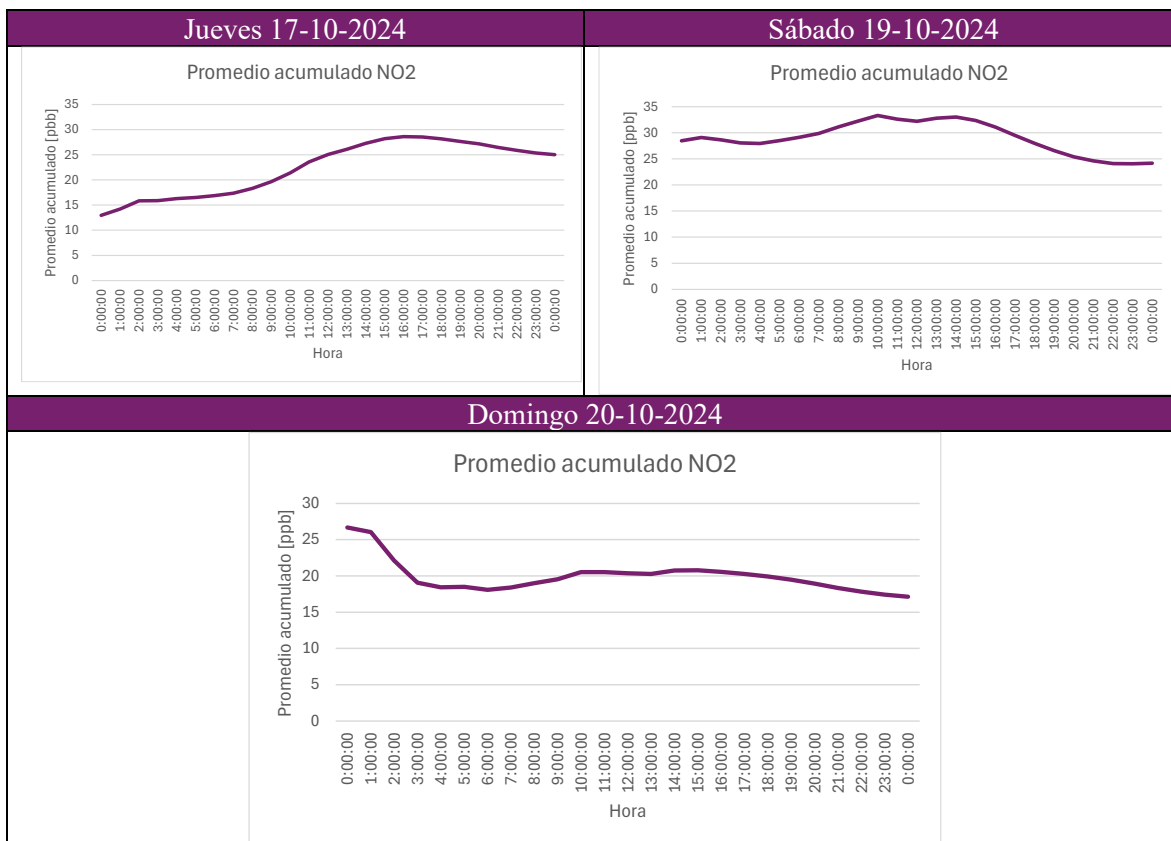


Gráfico 24: Mediciones del NO2 cada 15 minutos de la Semana 1.

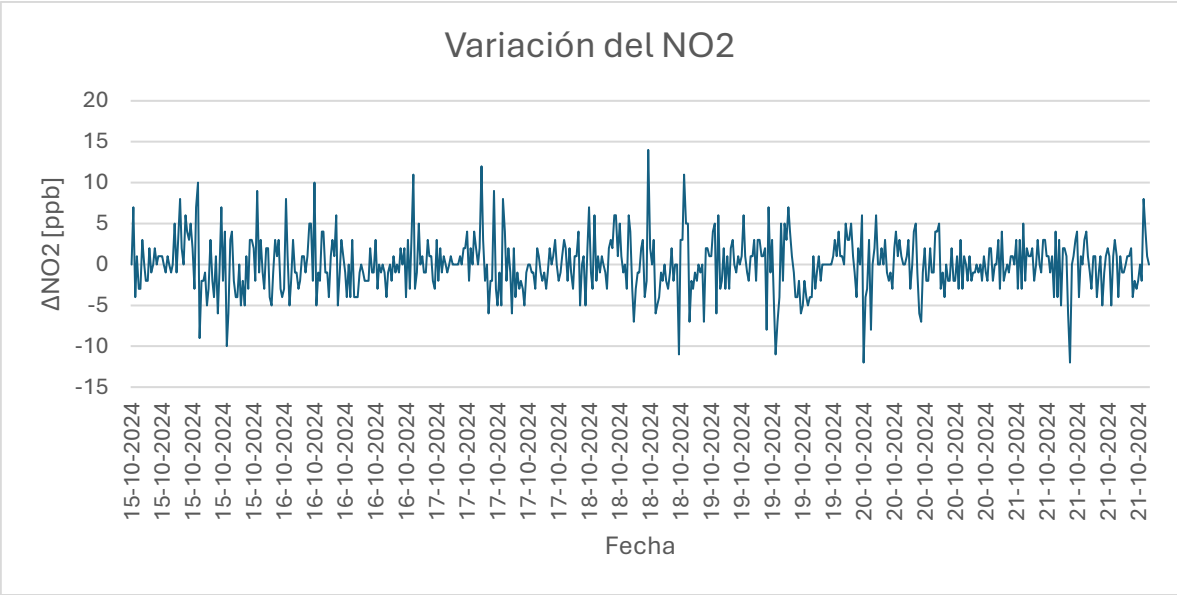


Gráfico 25: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO2 en la Semana 1.

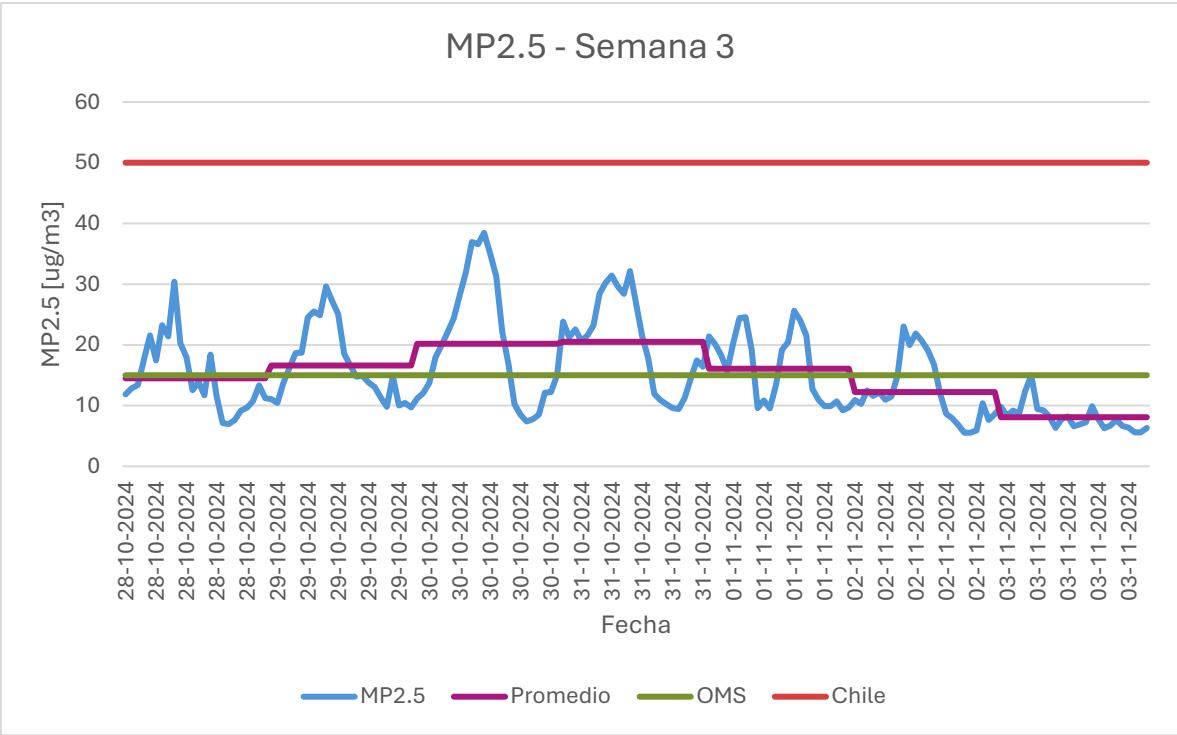


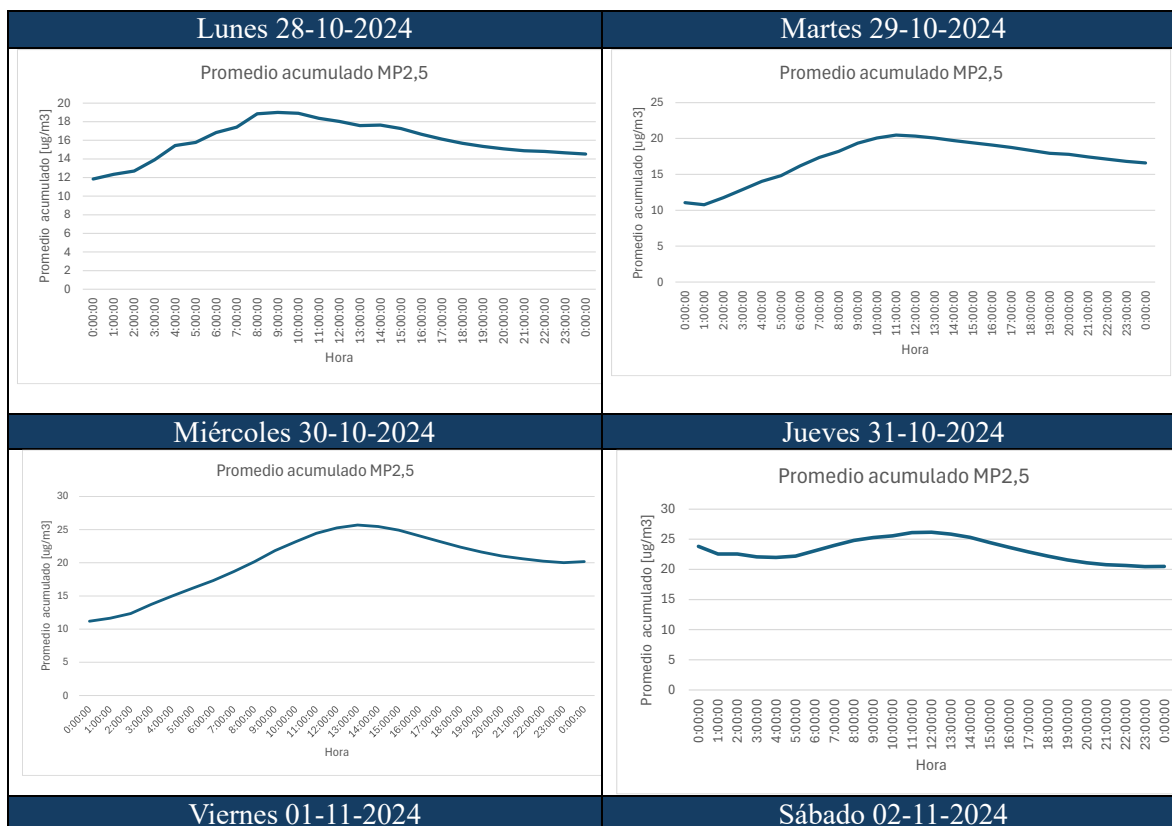
Gráfico 26: Datos del MP2,5 obtenidos en la Semana 3 con su promedio diario y los límites de promedio diario de la OMS y de las normativas chilenas.

Tabla 38: Datos específicos extraídos del gráfico generado del material particulado 2.5 de la Semana 3.

MP2,5	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
-------	-------	--------	-----------	--------	---------	--------	---------

Datos mayores al promedio	9	9	11	15	12	8	11
Horas	03:00 a 10:00 14:00	04:00 a 12:00	05:00 a 14:00	00:00 a 13:00	00:00 a 02:00 04:00 a 07:00 12:00 a 16:00	02:00 07:00 a 13:00	00:00 a 08:00 11:00 15:00
Promedio [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	14,5188	16,5908	20,1744	20,4996	16,0952	12,2036	8,0864

Tabla 39: Gráficos del promedio acumulado horario del MP2.5 de la Semana 3.



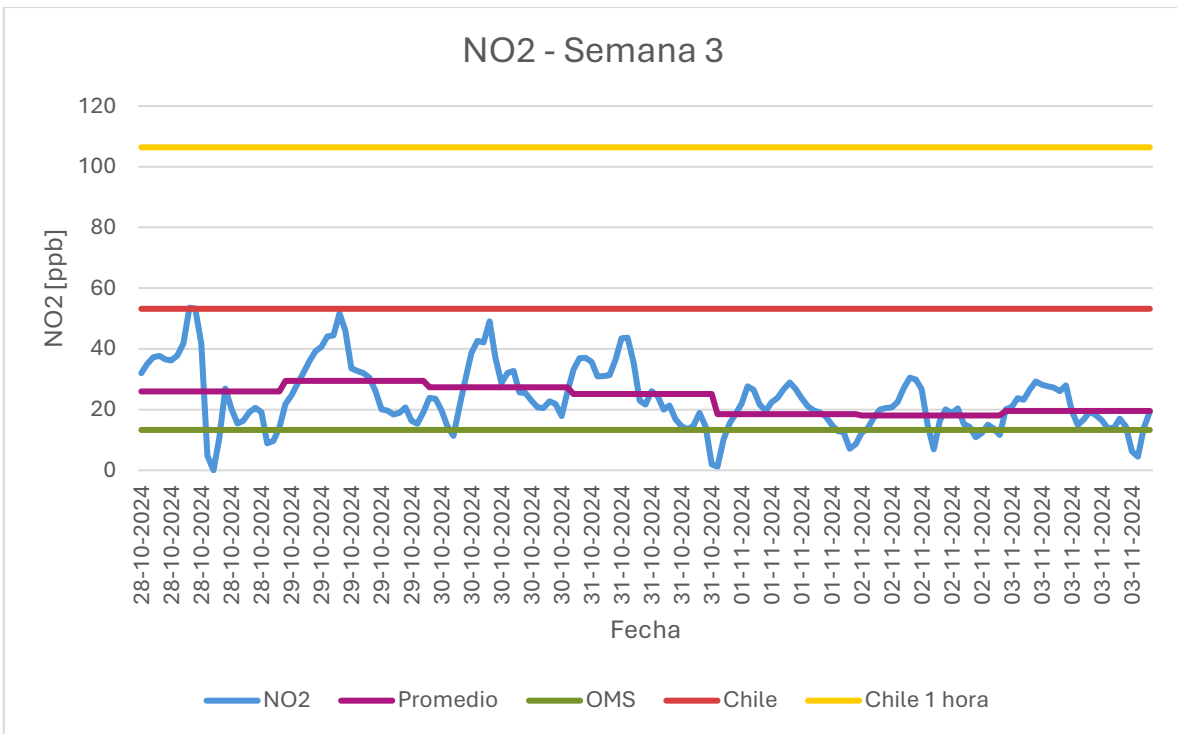
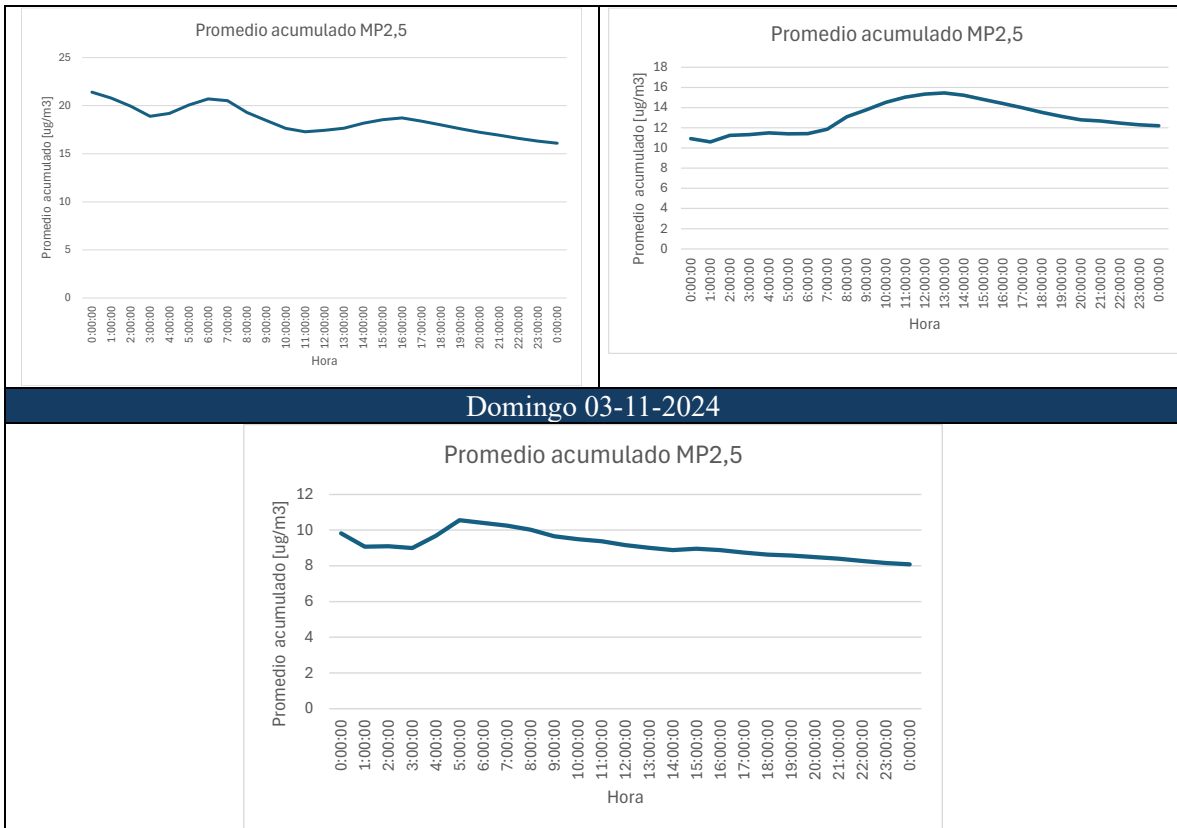
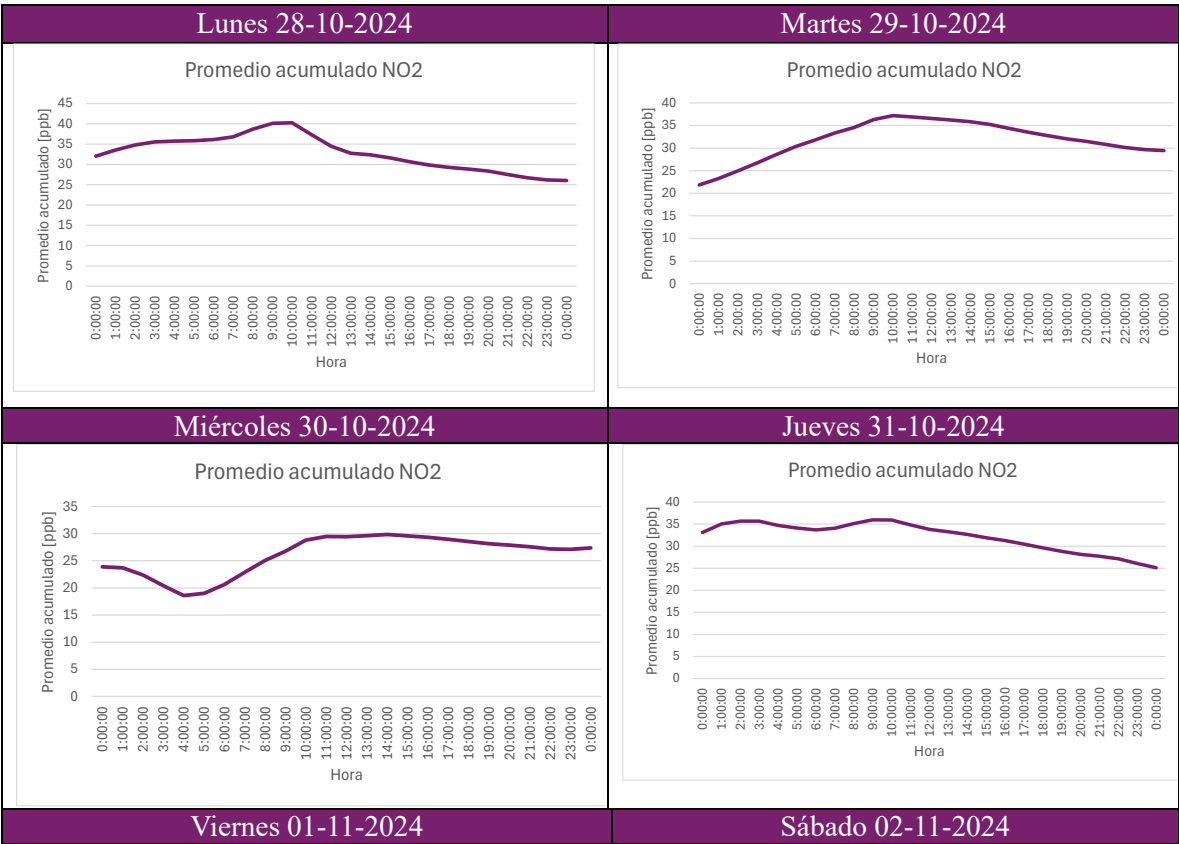


Gráfico 27: Datos por hora del NO₂ obtenidos en la Semana 3 con su promedio diario y los límites de promedio horario y diario de la OMS y de las normativas chilenas.

Tabla 40: Datos específicos extraídos del gráfico generado del dióxido de nitrógeno de la Semana 3.

NO ₂	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Datos mayores al promedio	12	12	10	12	15	12	12
Horas	00:00 a 10:00 14:00	03:00 a 14:00	06:00 a 14:00	00:00 a 10:00 13:00	03:00 a 17:00	03:00 a 10:00 14:00 a 16:00 00:00	00:00 a 11:00
Promedio [ppb]	26,011	29,449	27,358	25,095	18,469	18,060	19,583

Tabla 41: Gráficos del promedio acumulado horario del NO₂ de la Semana 3.



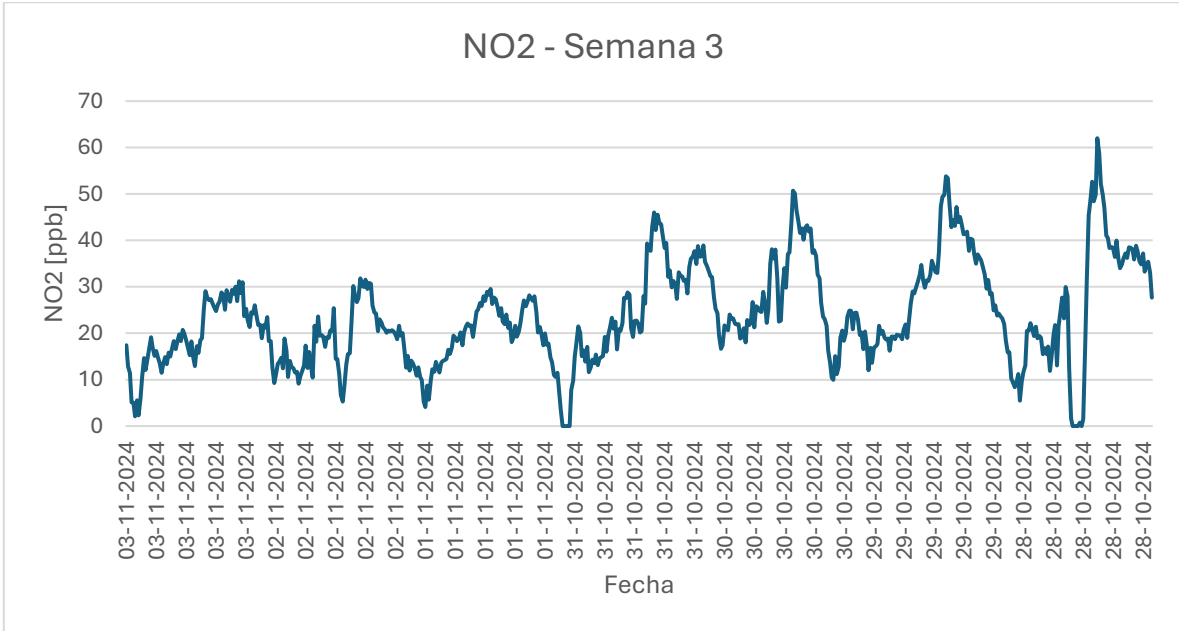
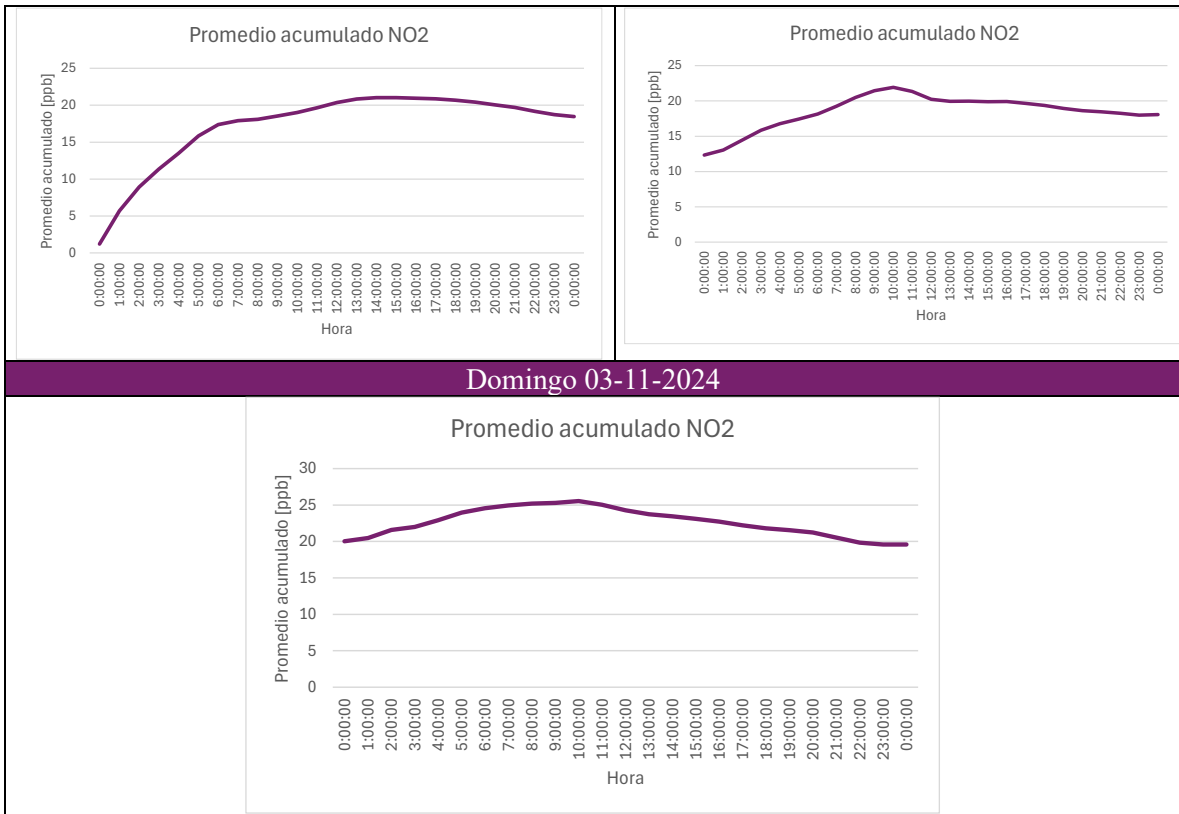


Gráfico 28: Mediciones del NO2 cada 15 minutos de la Semana 3.

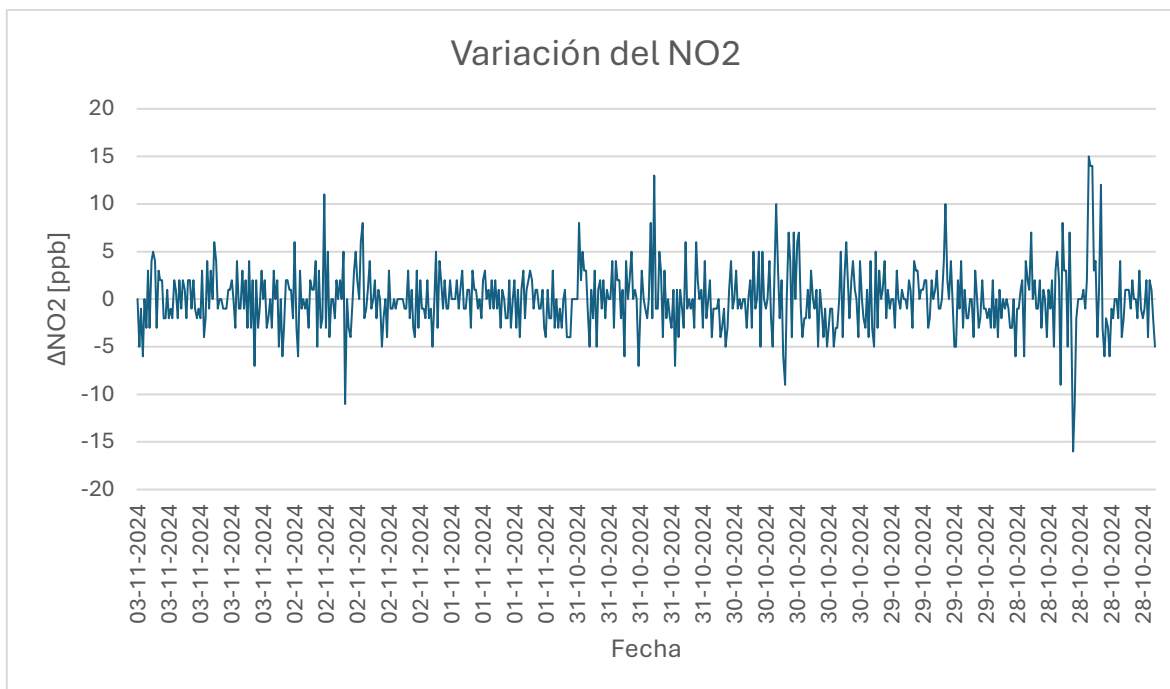


Gráfico 29: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO₂ en la Semana 3.

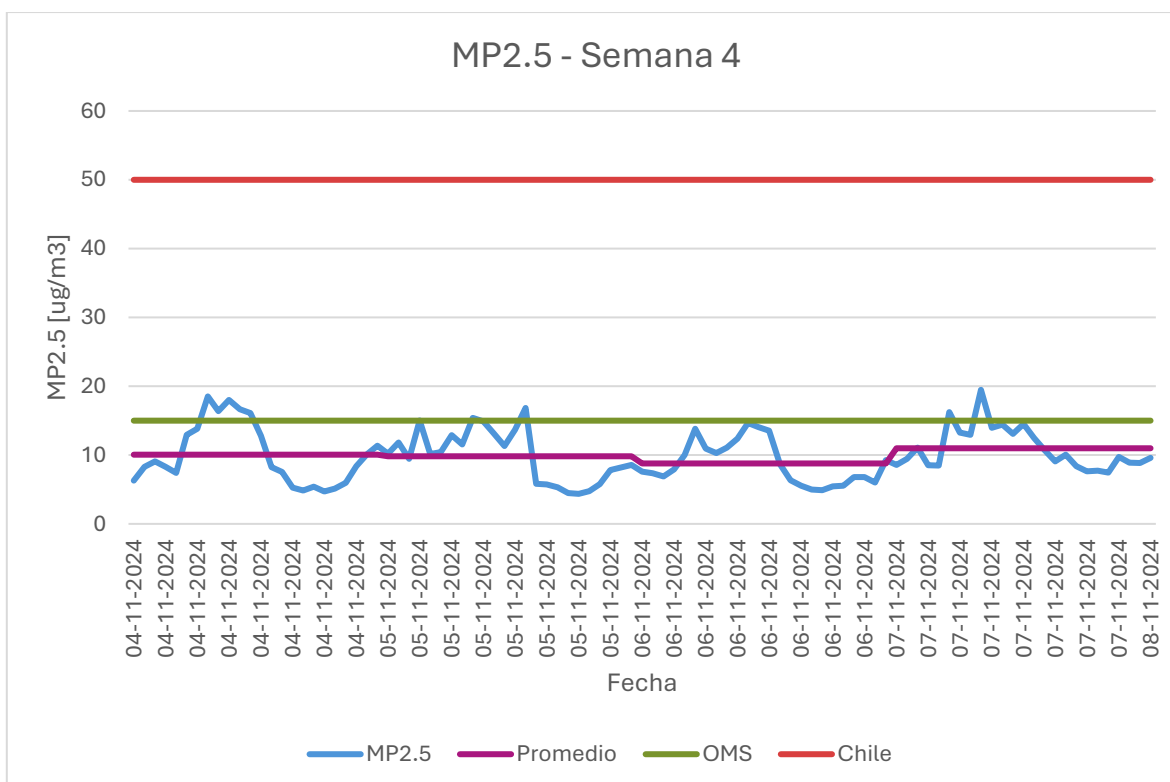
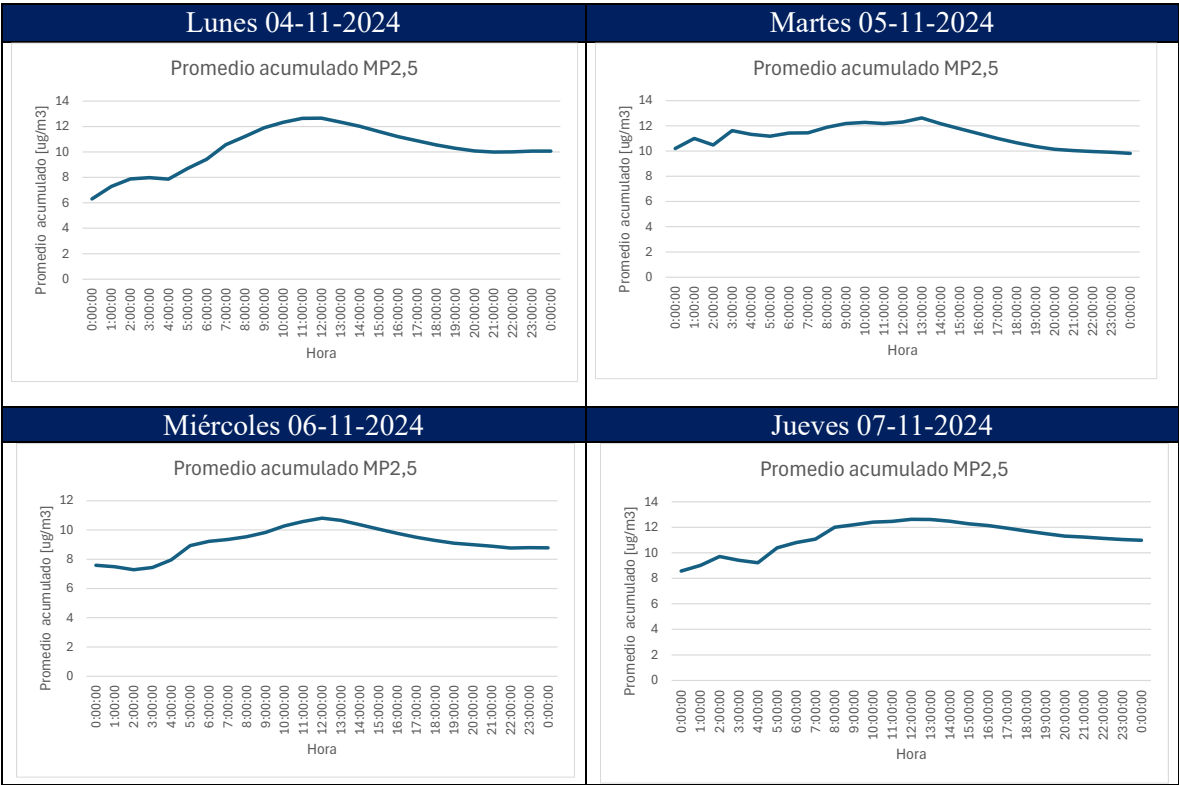


Gráfico 30: Datos del MP2,5 obtenidos en la Semana 4 con su promedio diario y los límites de promedio diario de la OMS y de las normativas chilenas.

Tabla 42: Datos específicos extraídos del gráfico generado del material particulado 2.5 de la Semana 4.

MP2,5	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves
Datos mayores al promedio	11	13	10	10
Horas	05:00 a 12:00 22:00 a 00:00	00:00 a 01:00 03:00 a 13:00	04:00 a 12:00 23:00	02:00 05:00 a 13:00
Promedio [µg/m³]	10,0652	9,8072	8,7776	10,9844

Tabla 43: Gráficos del promedio acumulado horario del MP2.5 de la Semana 4.



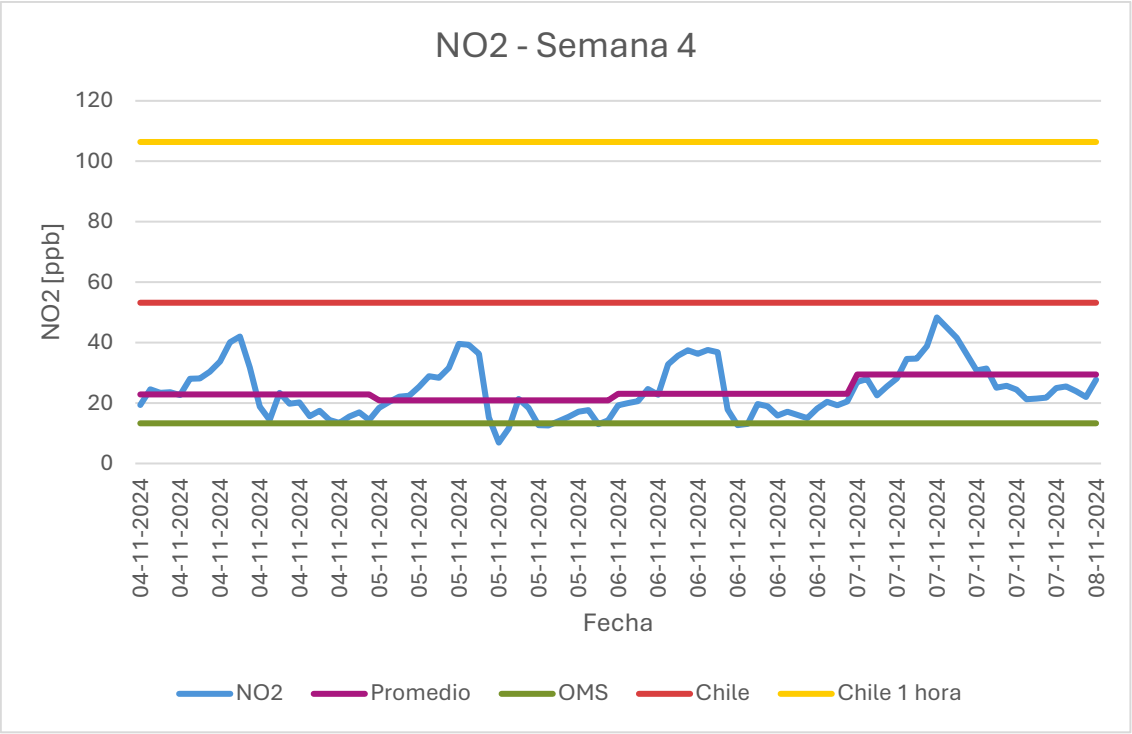


Gráfico 31: Datos por hora del NO₂ obtenidos en la Semana 4 con su promedio diario y los límites de promedio horario y diario de la OMS y de las normativas chilenas.

Tabla 44: Datos específicos extraídos del gráfico generado del dióxido de nitrógeno de la Semana 4.

NO ₂	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves
Datos mayores al promedio	11	10	8	9
Horas	01:00 a 03:00	02:00 a 10:00	03:00	05:00 a 13:00
	05:00 a 11:00	14:00	05:00 a 10:00	
	14:00		00:00	
Promedio [ppb]	22,809	20,883	23,018	29,444

Tabla 45: Gráficos del promedio acumulado horario del NO₂ de la Semana 4.

Lunes 04-11-2024	Martes 05-11-2024
------------------	-------------------

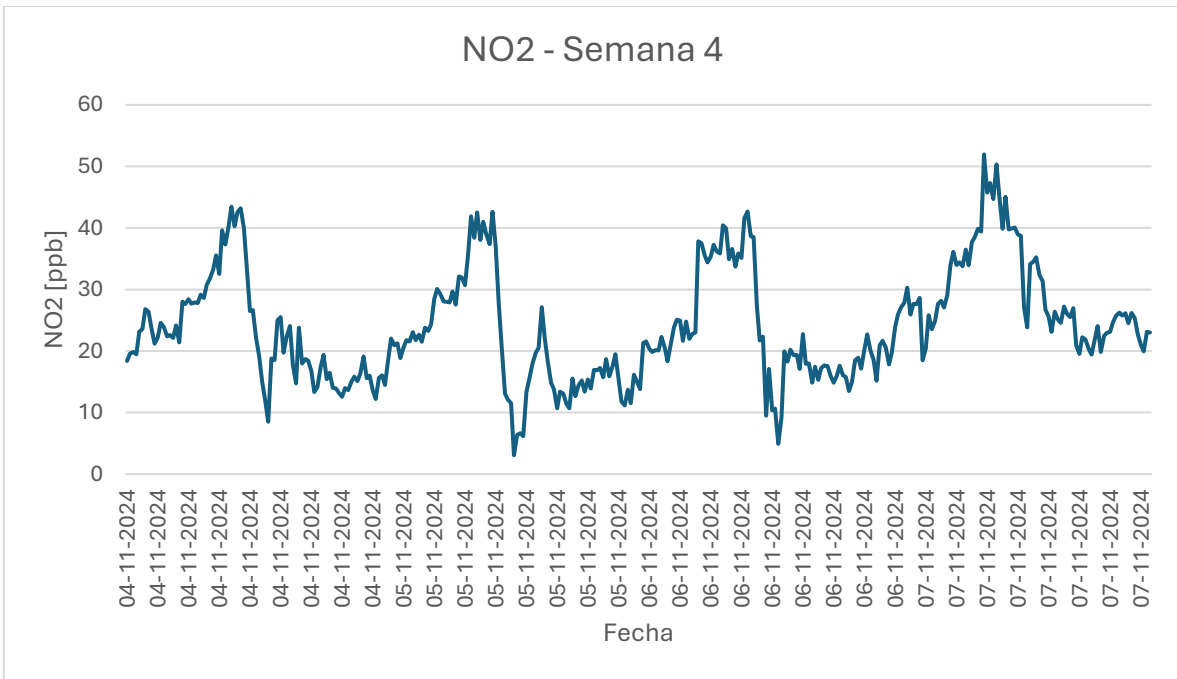
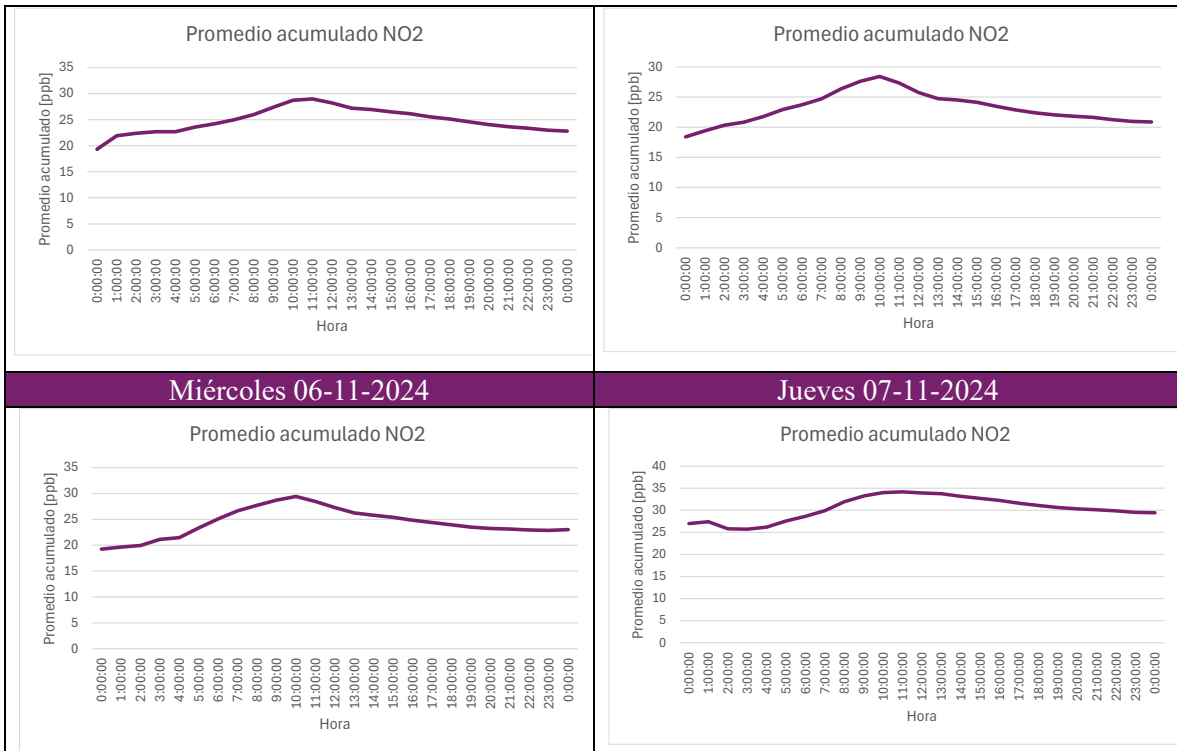


Gráfico 32: Mediciones del NO₂ cada 15 minutos de la Semana 4.

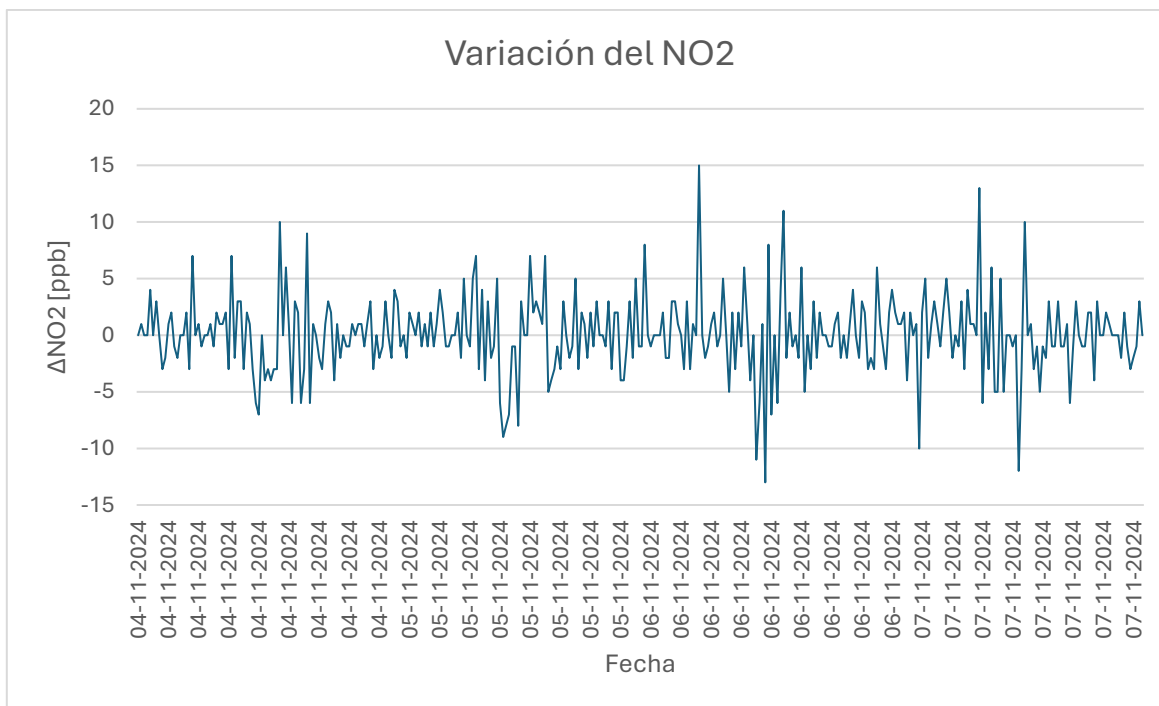


Gráfico 33: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO₂ en la Semana 4.

Anexo A.2: Zona industrial

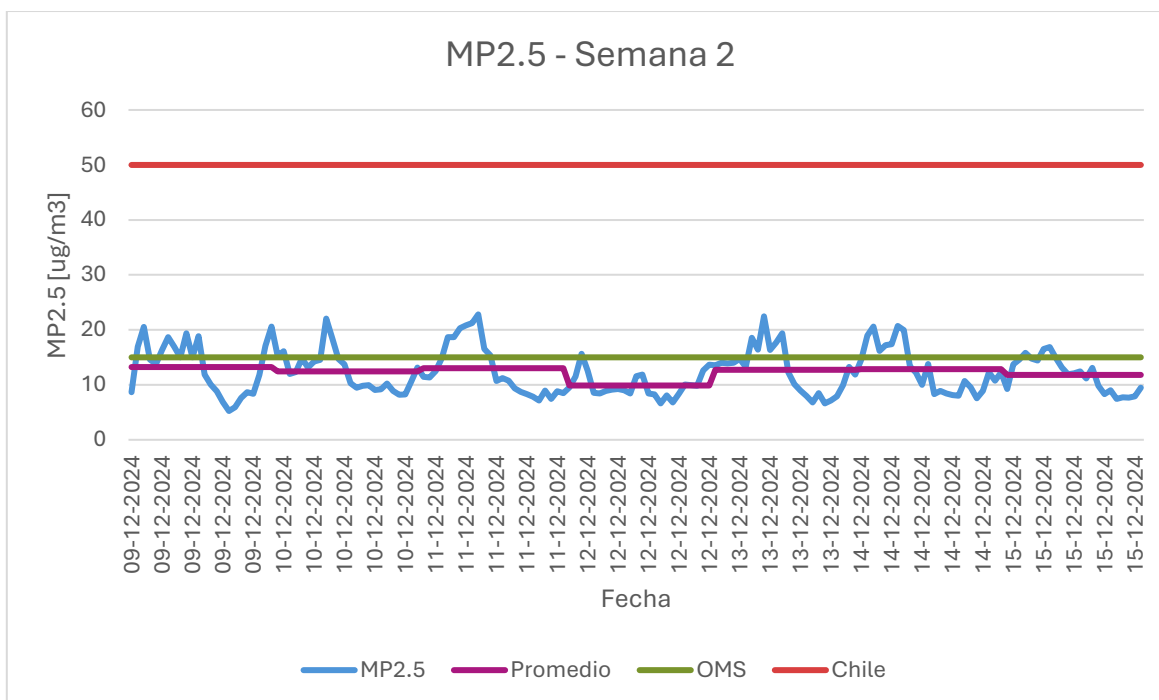
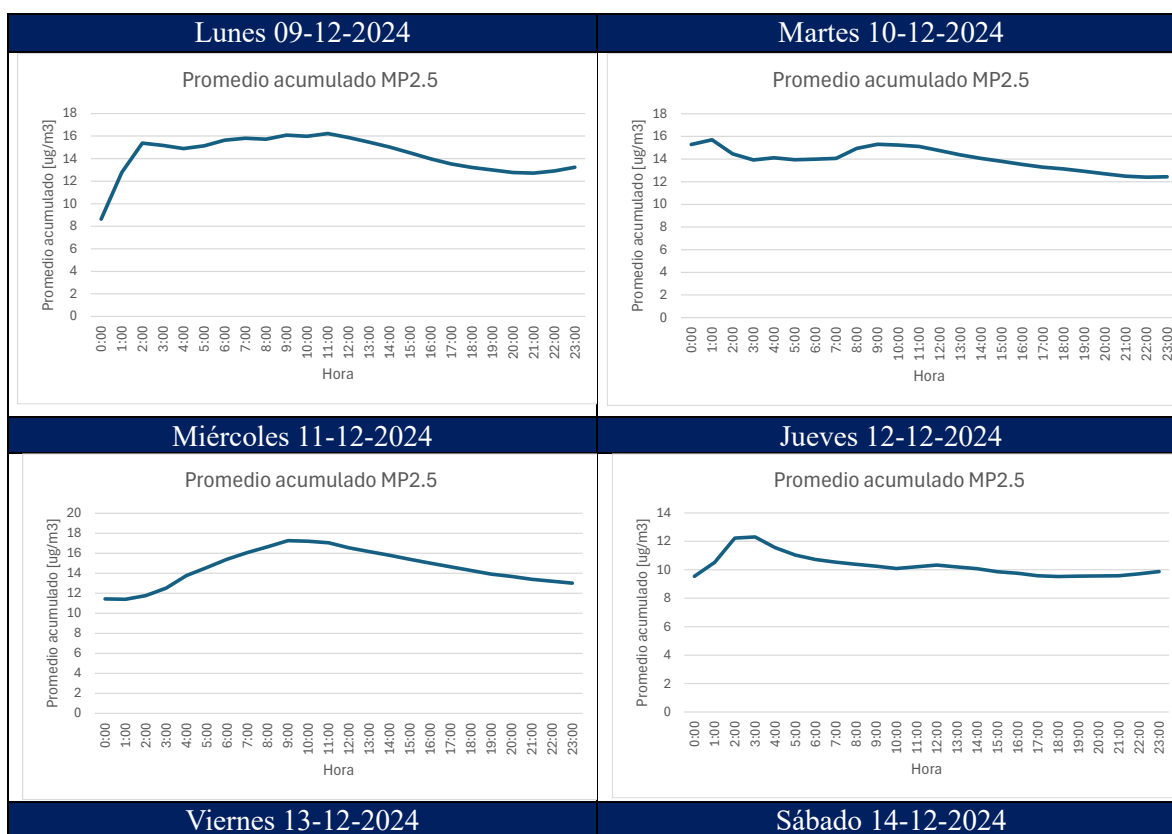


Gráfico 34: Datos del MP2,5 obtenidos en la Semana 2 con su promedio diario y los límites de promedio diario de la OMS y de las normativas chilenas.

Tabla 46: Datos específicos extraídos del gráfico generado del material particulado 2.5 de la Semana 2.

MP2,5	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Datos mayores al promedio	13	11	9	9	13	10	13
Horas	01:00 a 11:00 22:00 a 23:00	00:00 a 01:00 04:00 a 11:00 23:00	03:00 a 11:00	01:00 a 03:00 11:00 a 12:00 19:00 a 20:00 22:00 a 23:00	00:00 a 11:00 22:00	00:00 a 08:00 11:00	01:00 a 12:00 14:00
Promedio [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	13,231	12,439	13,006	9,876	12,727	12,861	11,827

Tabla 47: Gráficos del promedio acumulado horario del MP2.5 de la Semana 2.



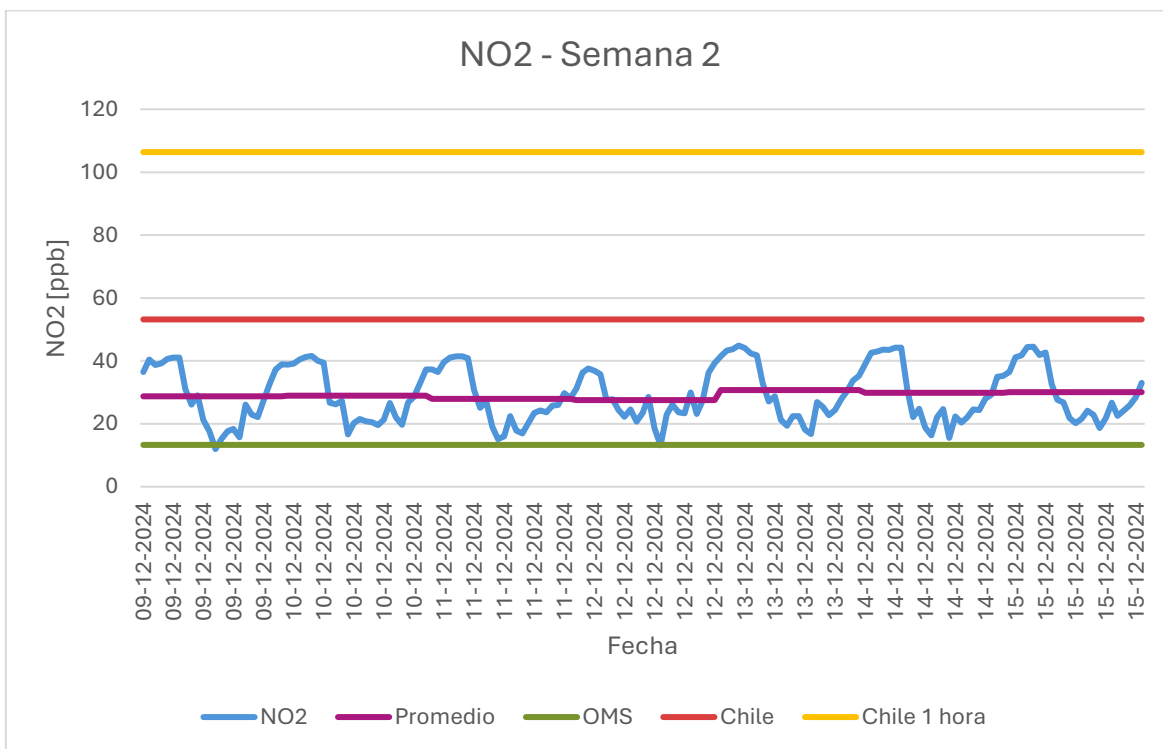
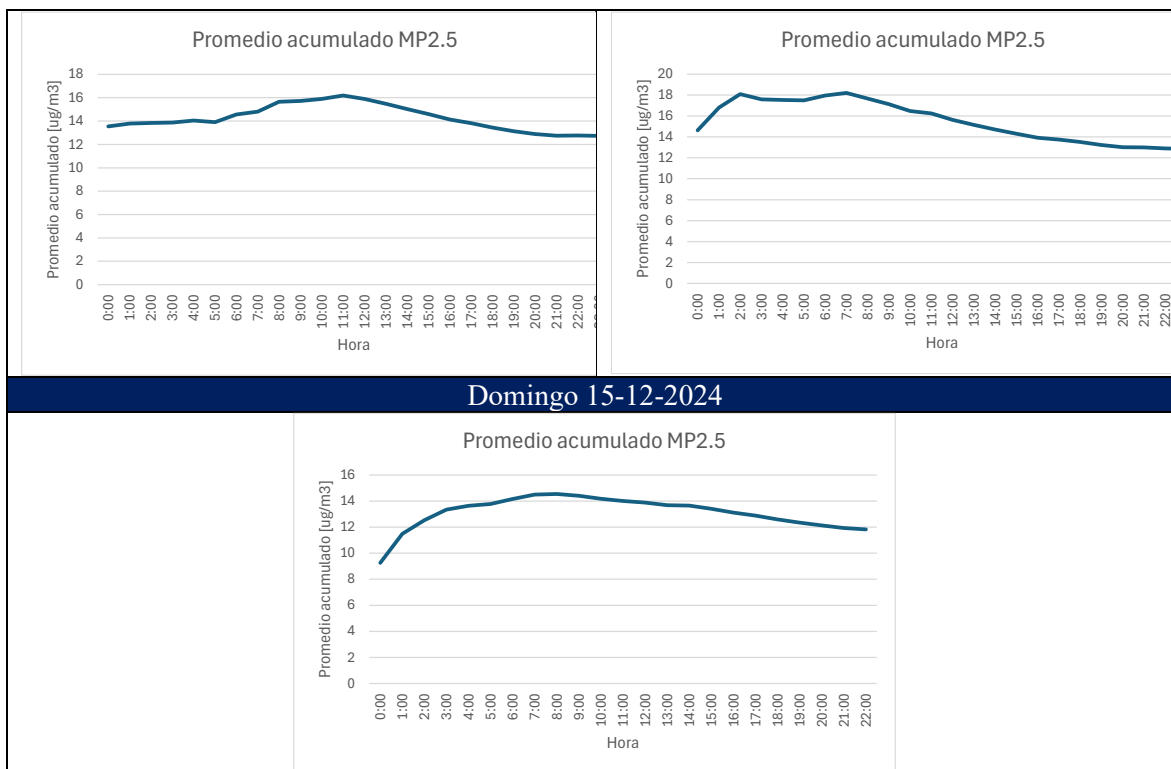
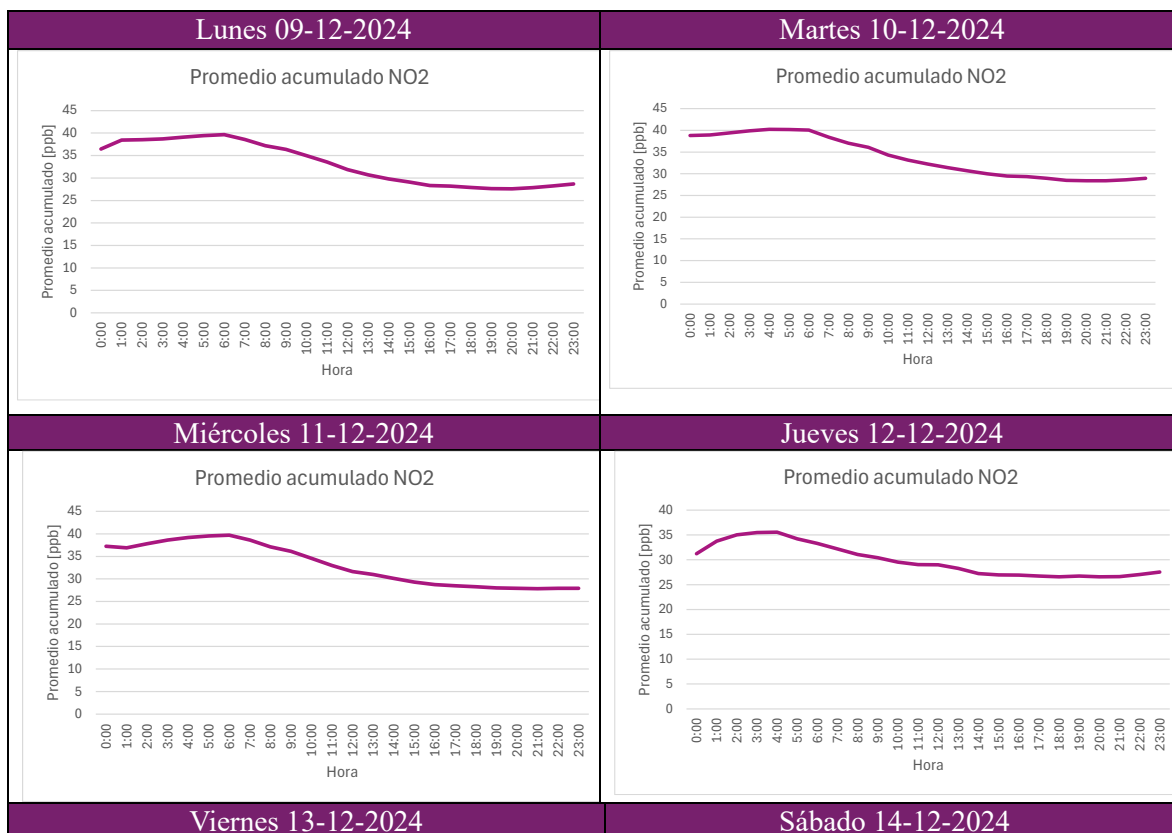


Gráfico 35: Datos por hora del NO₂ obtenidos en la Semana 2 con su promedio diario y los límites de promedio horario y diario de la OMS y de las normativas chilenas.

Tabla 48: Datos específicos extraídos del gráfico generado del NO₂ de la Semana 2.

NO ₂	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Datos mayores al promedio	12	9	10	11	10	9	9
Horas	00:00 a 07:00 09:00 21:00 a 23:00	00:00 a 06:00 22:00 a 23:00	00:00 a 07:00 22:00 a 23:00	00:00 a 06:00 12:00 a 19:00 22:00 a 23:00	00:00 a 07:00 22:00 a 23:00	00:00 a 07:00 23:00	00:00 a 07:00 22:00
Promedio [ppb]	28,692	28,962	27,915	27,535	30,719	29,851	30,078

Tabla 49: Promedio acumulado horario del NO₂ de la Semana 2.



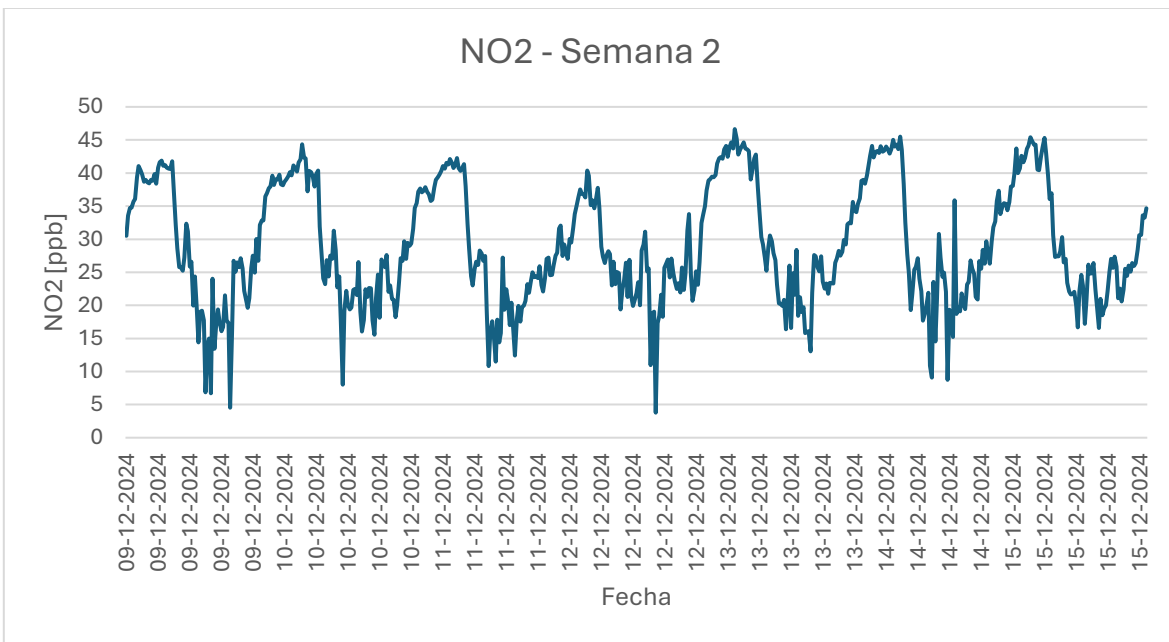
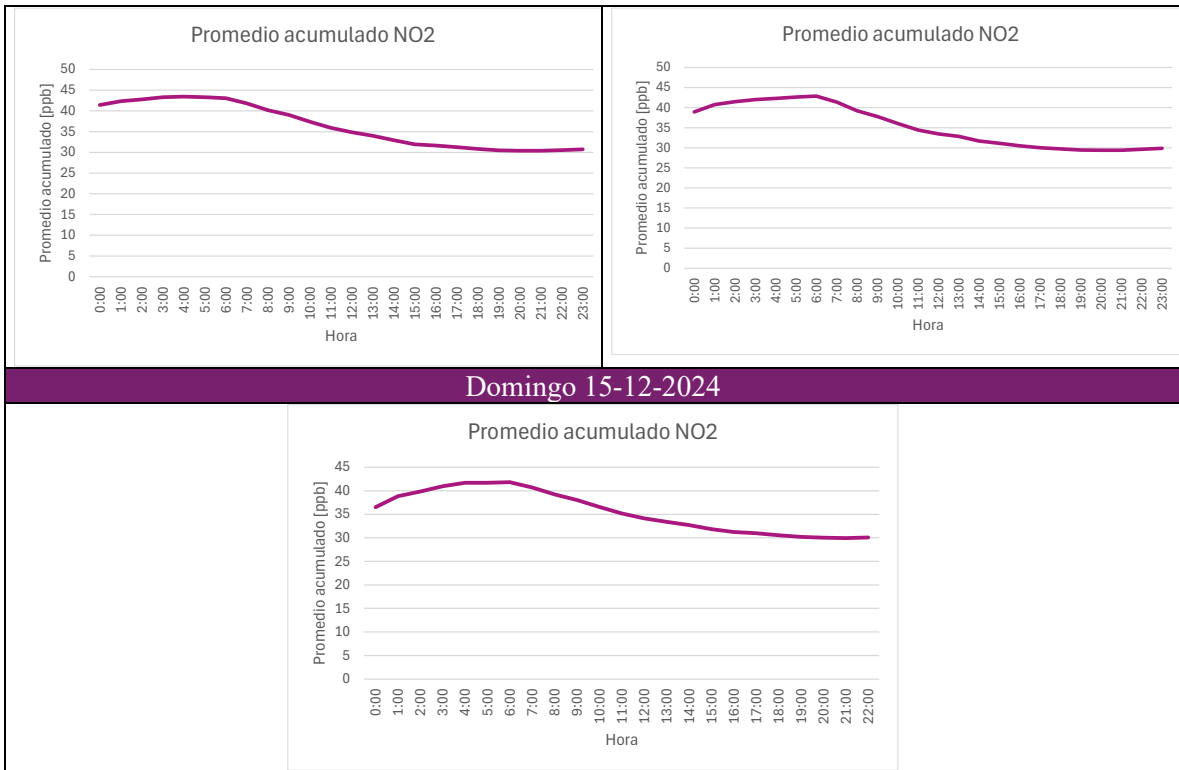


Gráfico 36: Mediciones del NO₂ cada 15 minutos de la Semana 2.

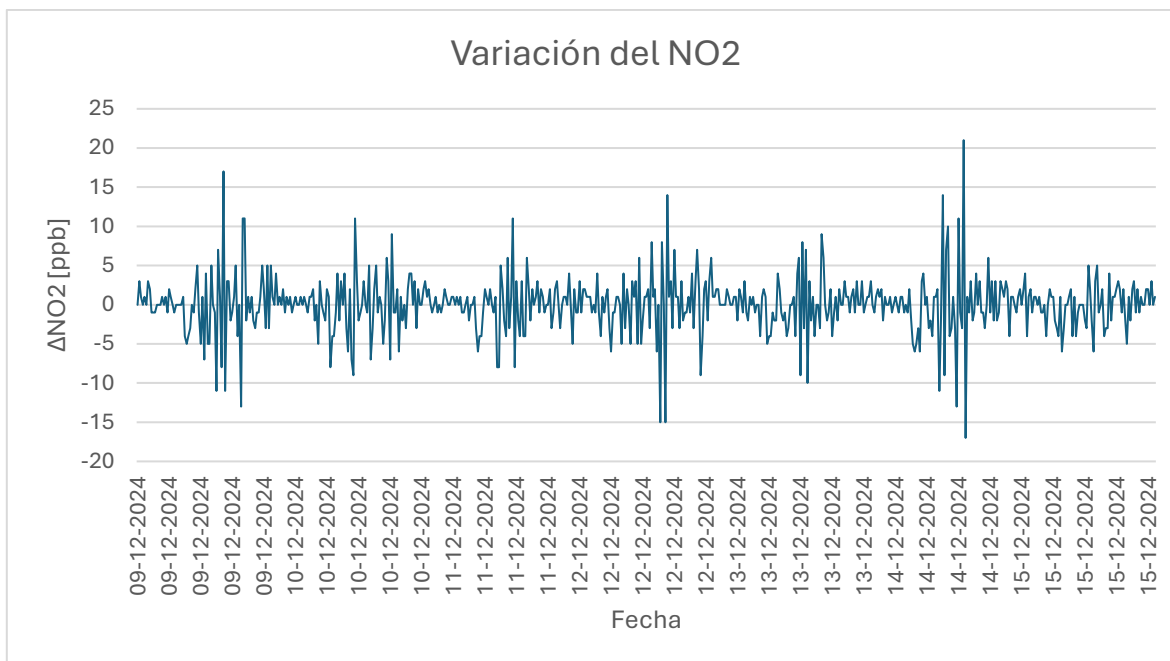


Gráfico 37: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO_2 en la Semana 2.

Anexo A.3: Zona de baja densidad vehicular

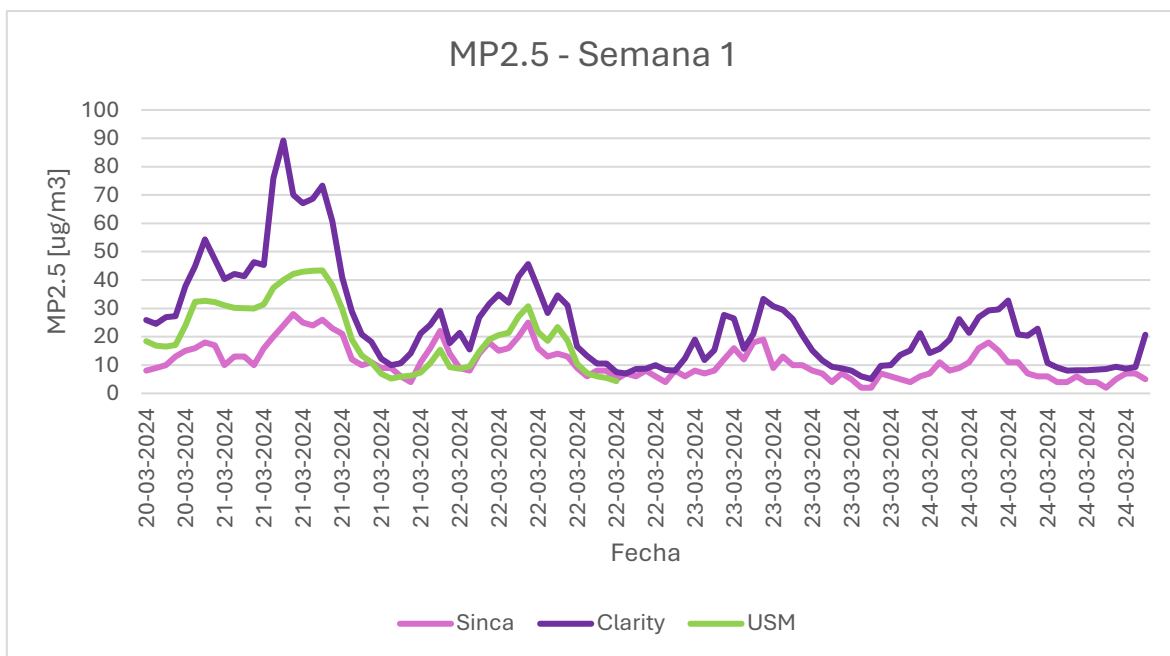


Gráfico 38: Datos horarios del MP2.5 extraídos de los dispositivos SINCA, Clarity y USM de la Semana 1.

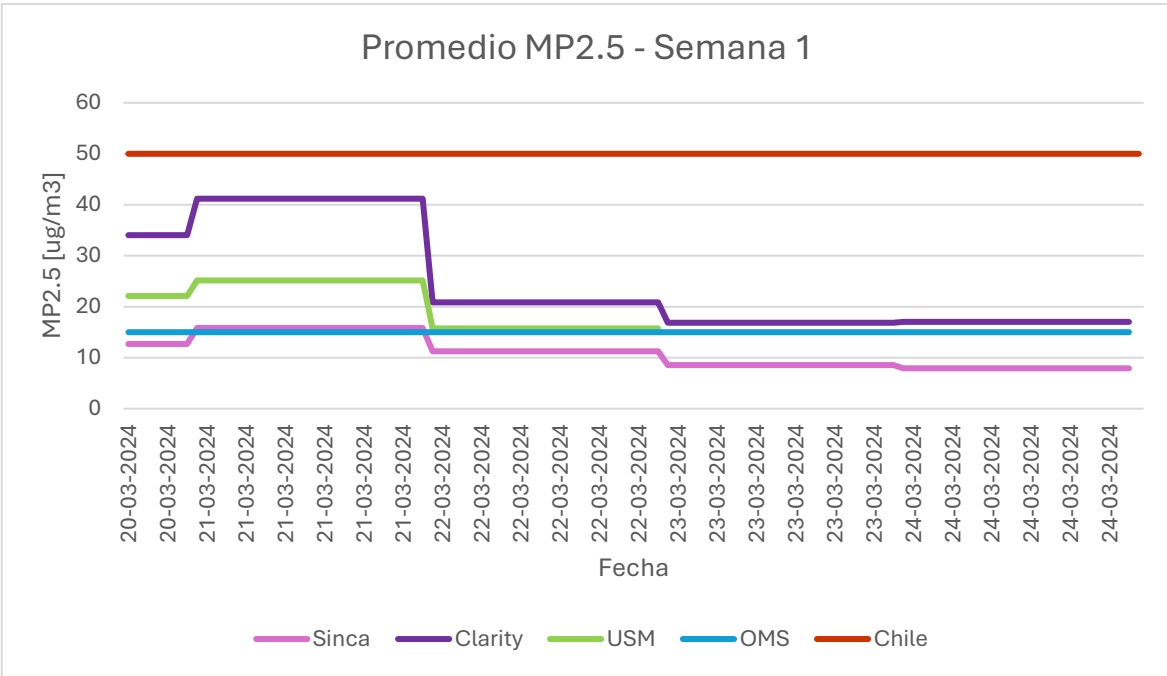
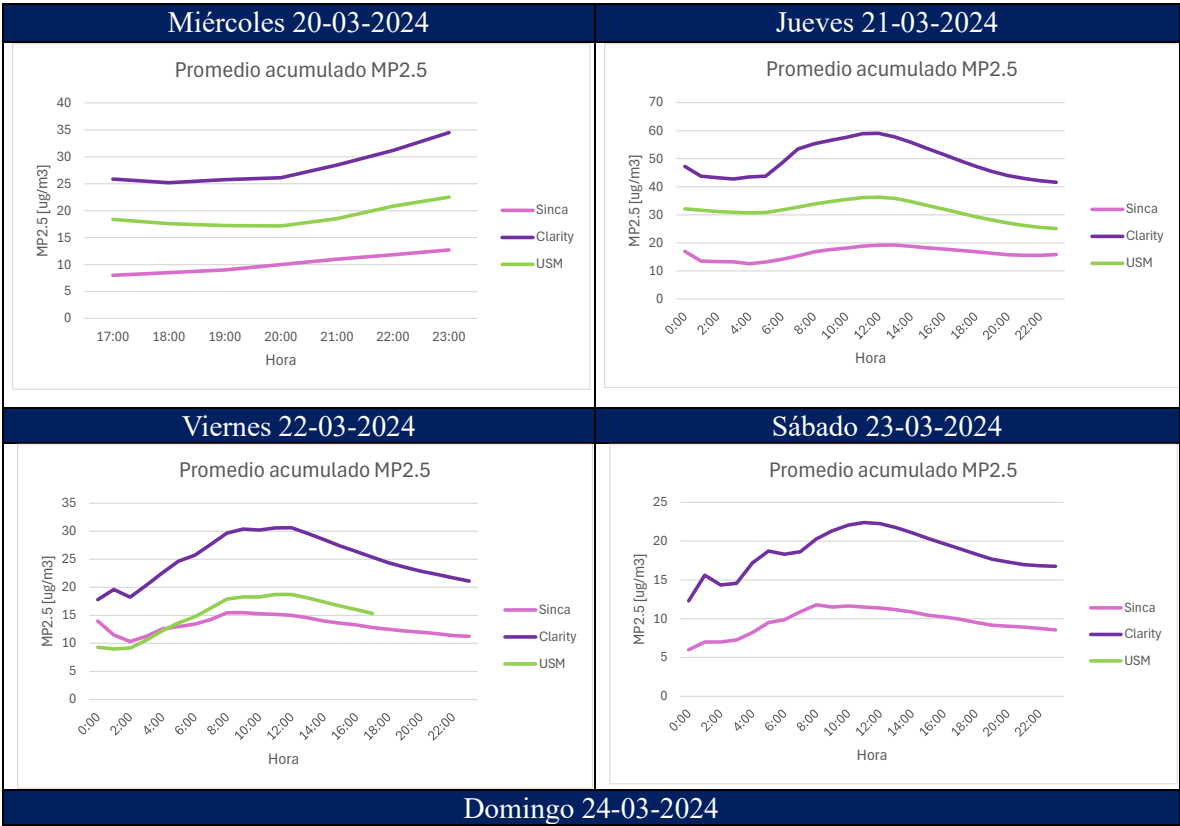


Gráfico 39: Promedios diarios del MP2.5 de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 1, en conjunto con las normas diarias de la OMS y chilena.

Tabla 50: Promedio acumulado horario del MP2.5 de cada día de los dispositivos SINCA, Clarity y USM, correspondiente a la Semana 1.



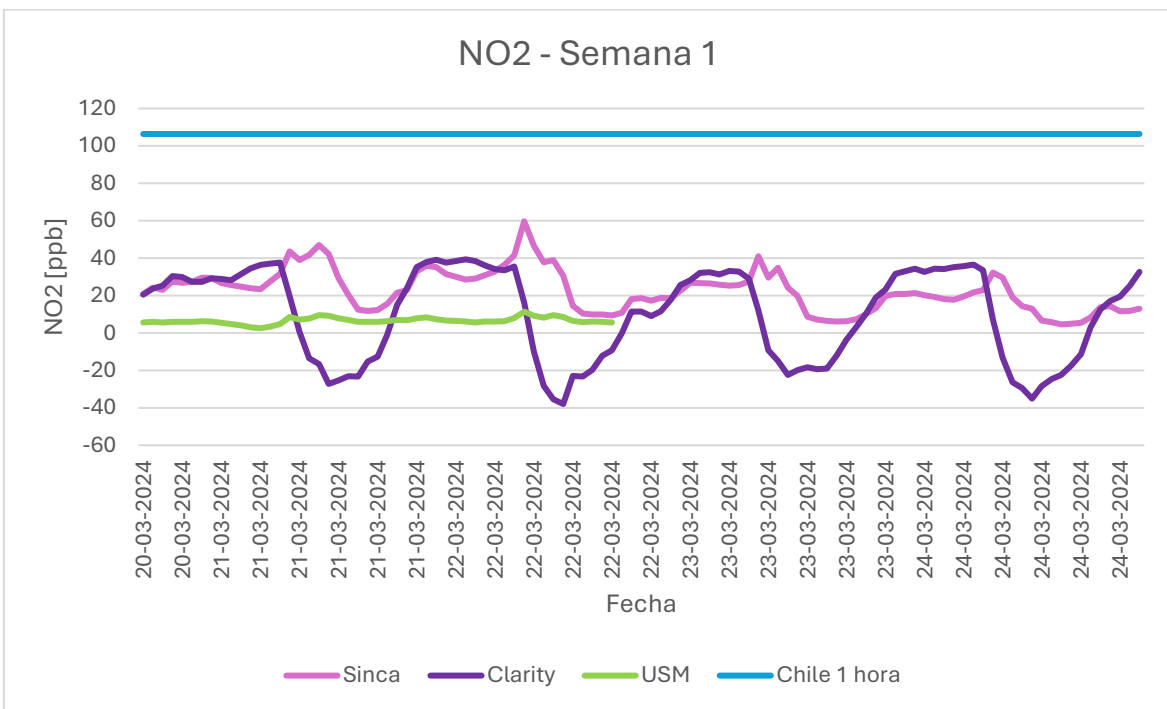
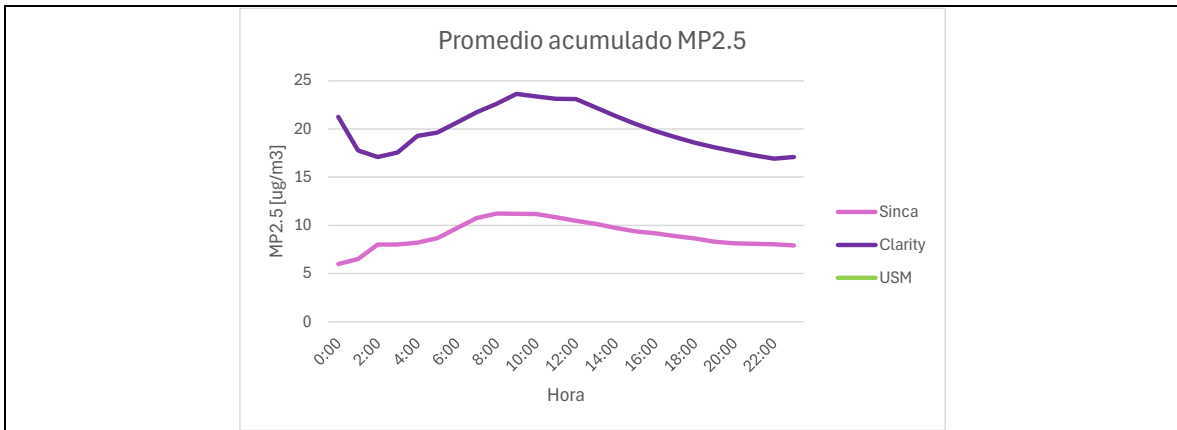


Gráfico 40: Datos horarios del NO₂ extraídos de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 1, en conjunto a la norma horaria chilena.

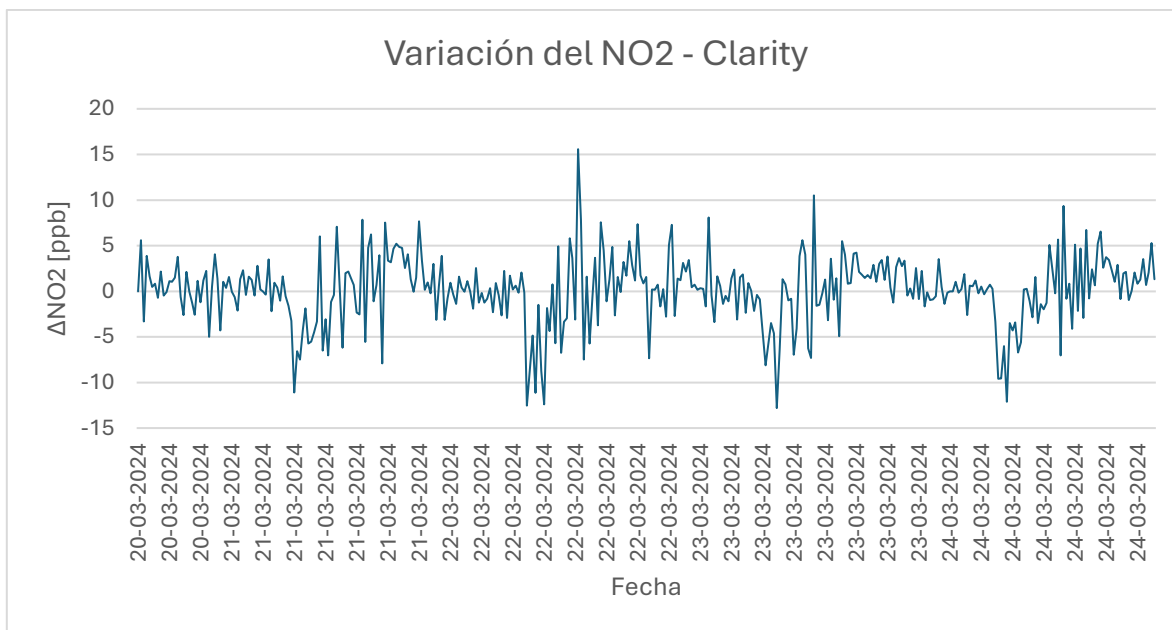


Gráfico 43: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO₂ del dispositivo Clarity de la Semana 1.

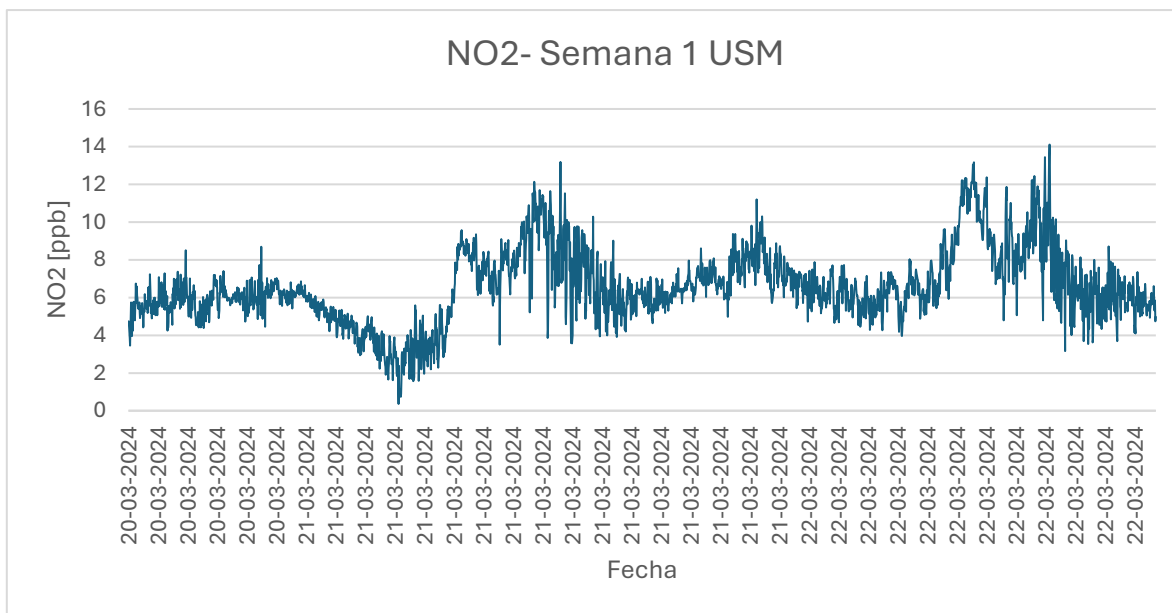


Gráfico 44: Mediciones cada 1 minuto del NO₂ del dispositivo USM de la Semana 1.

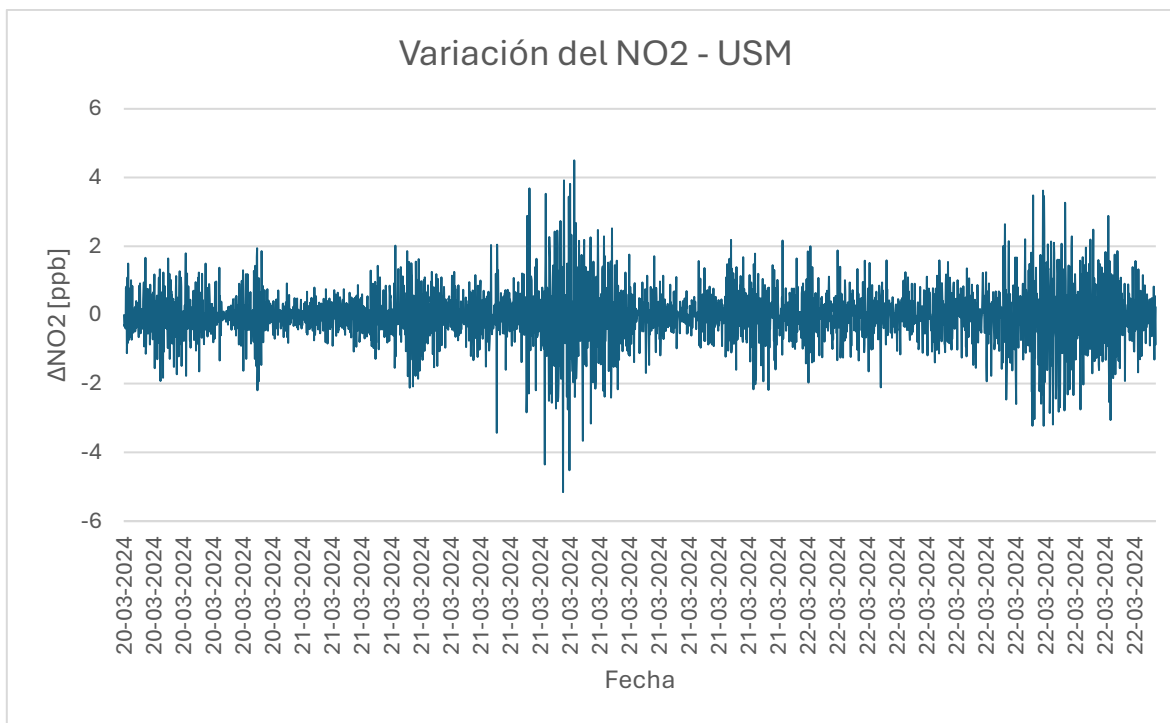


Gráfico 45: Variaciones de las mediciones de 1 minuto del NO₂ del dispositivo USM de la Semana 1.

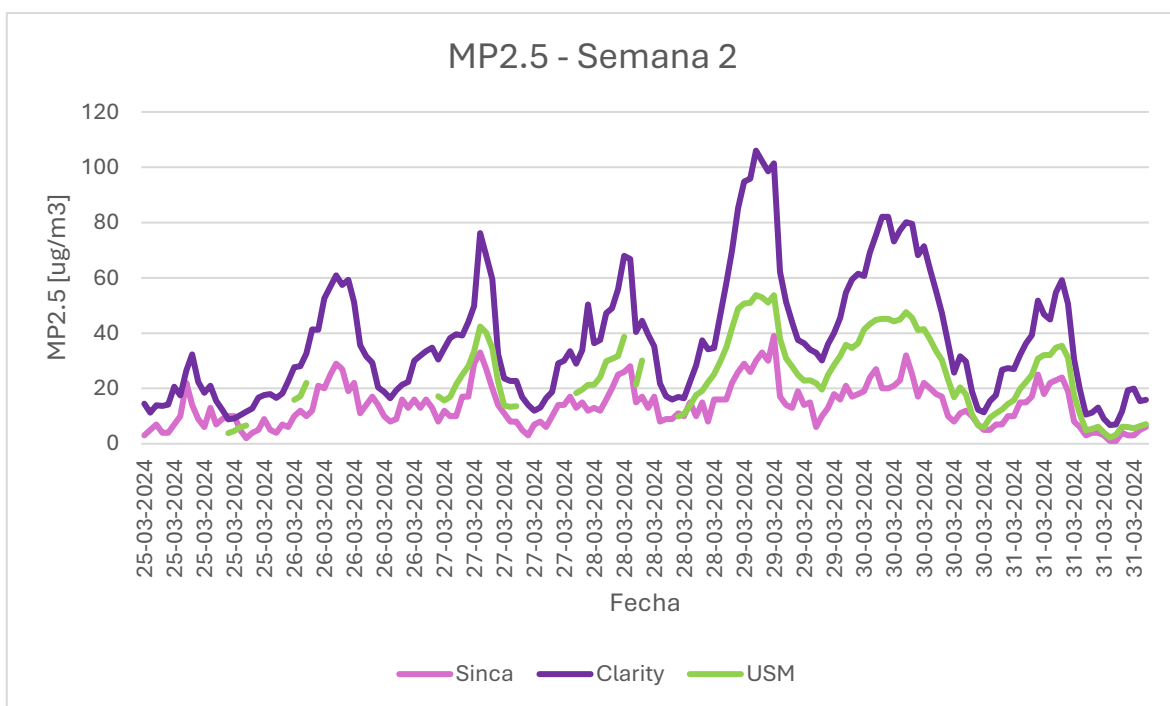


Gráfico 46: Datos horarios del MP_{2.5} extraídos de los dispositivos SINCA, Clarity y USM de la Semana 2.

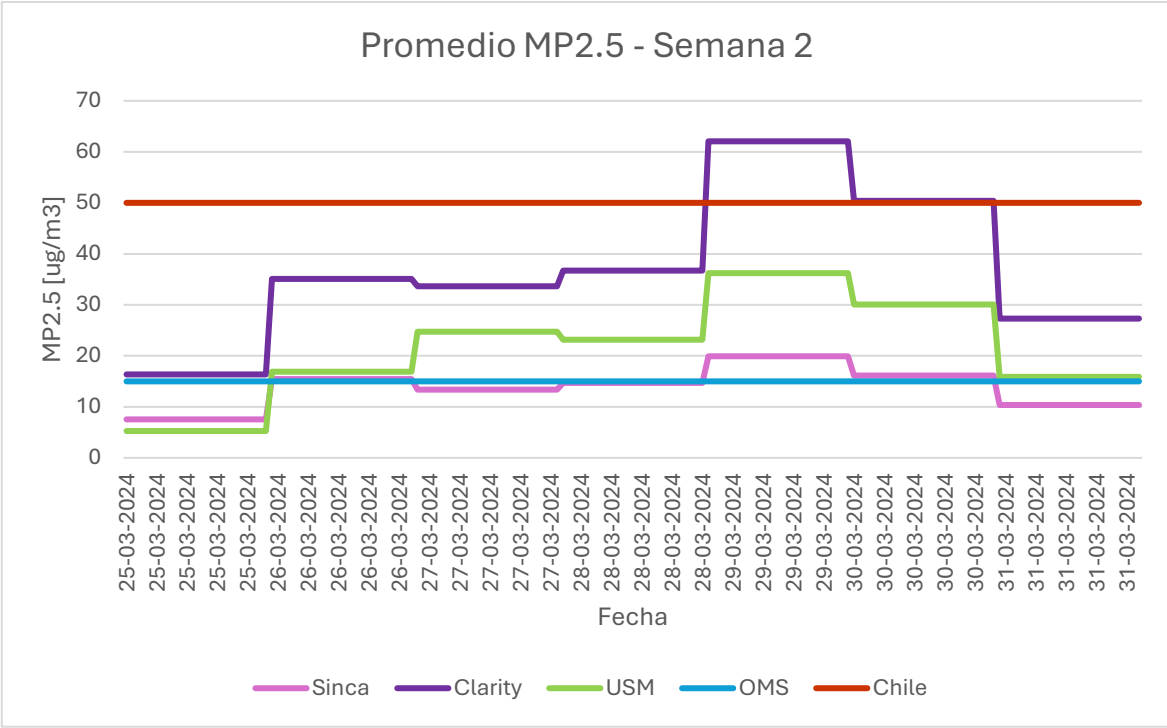
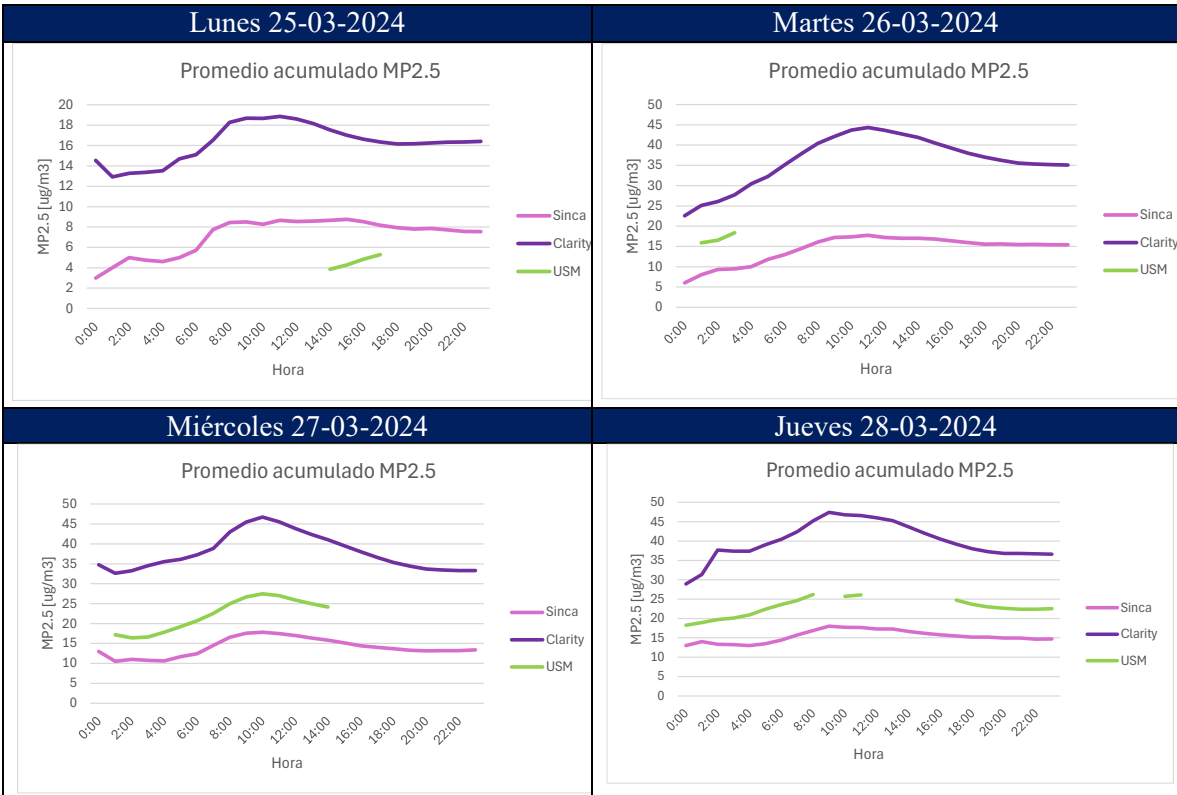


Gráfico 47: Promedios diarios del MP2.5 de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 2, en conjunto con las normas diarias de la OMS y chilena.

Tabla 52: Promedio acumulado horario del MP2.5 de cada día de los dispositivos SINCA, Clarity y USM, correspondiente a la Semana 2.



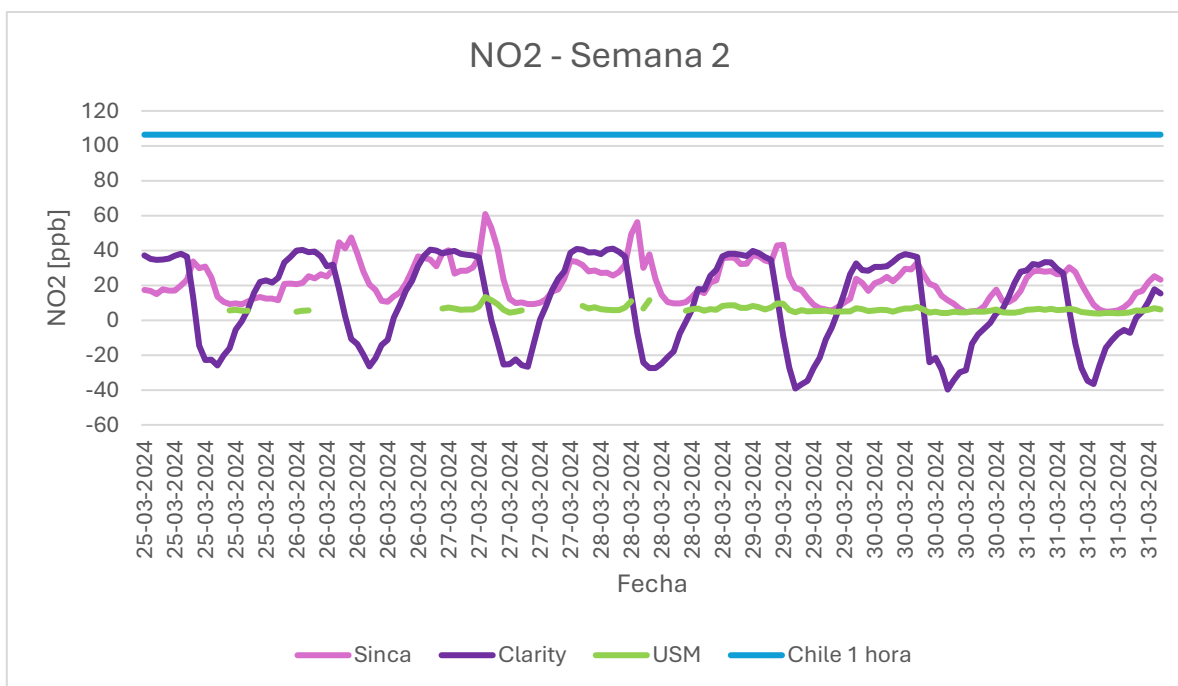
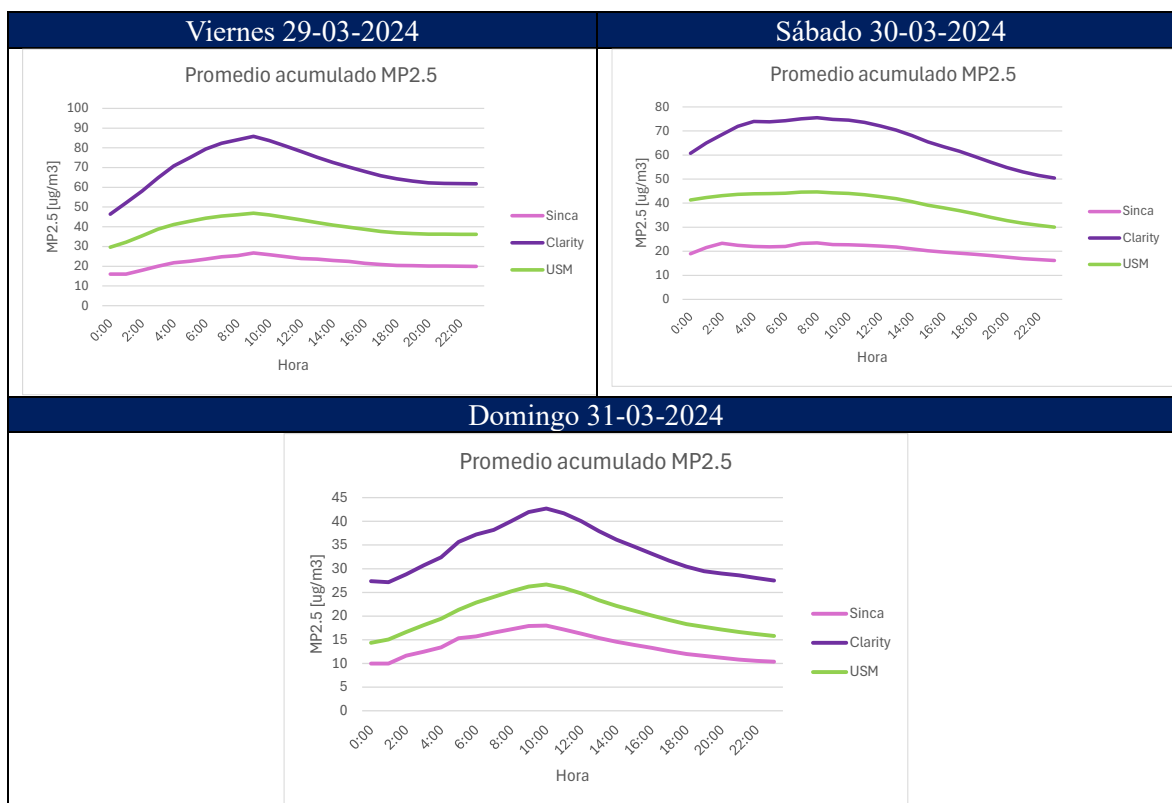


Gráfico 48: Datos horarios del NO₂ extraídos de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 2, en conjunto a la norma horaria chilena.

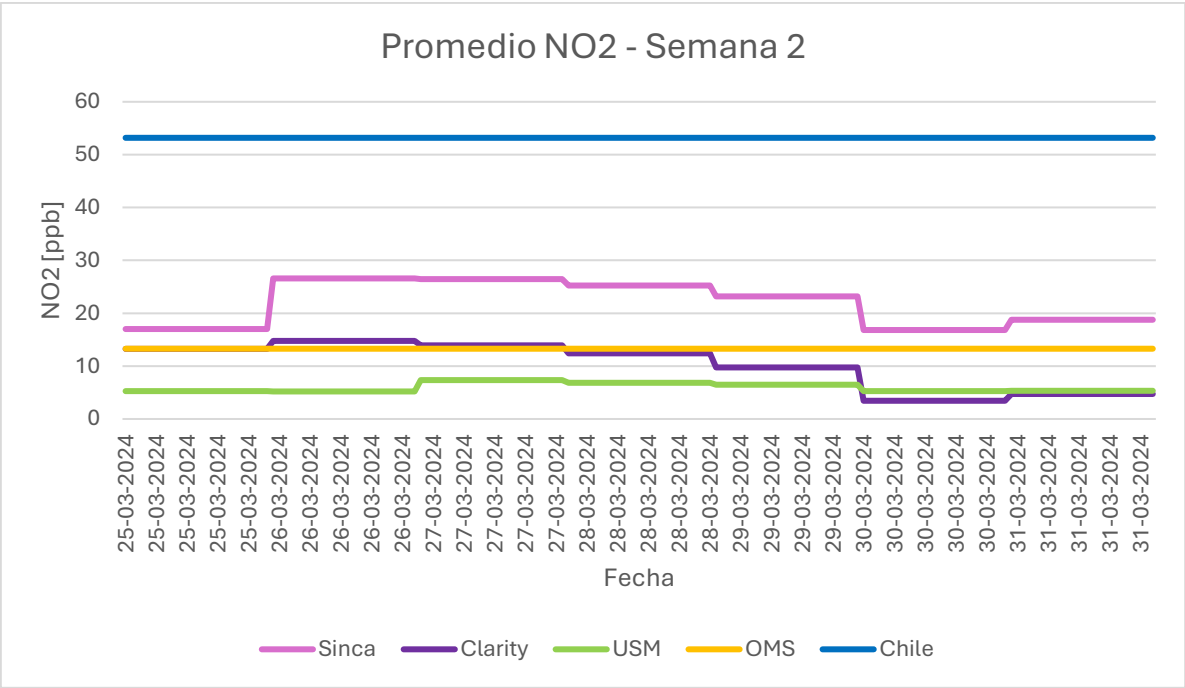
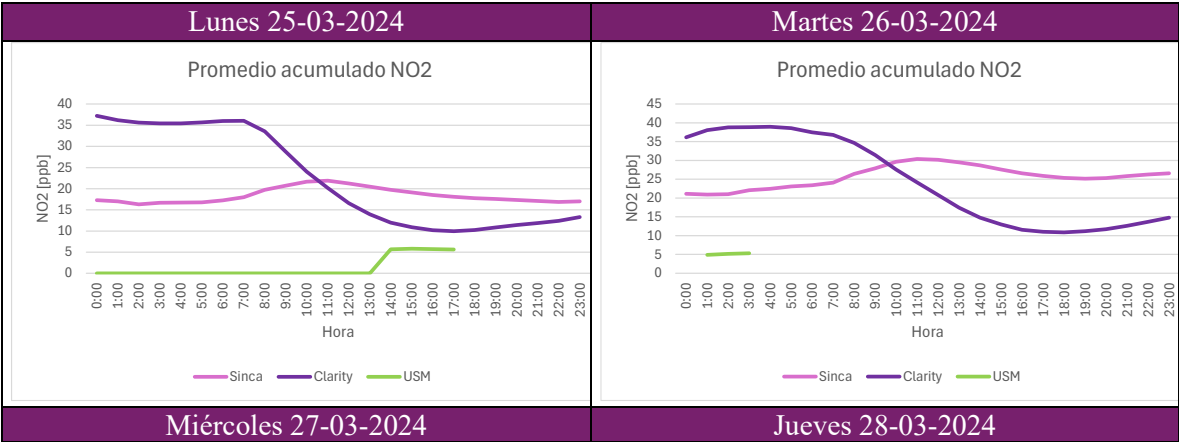


Gráfico 49: Promedios diarios del NO₂ de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 2, en conjunto con las normas diarias de la OMS y chilena.

Tabla 53: Promedios acumulados horarios del NO₂ de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 2.





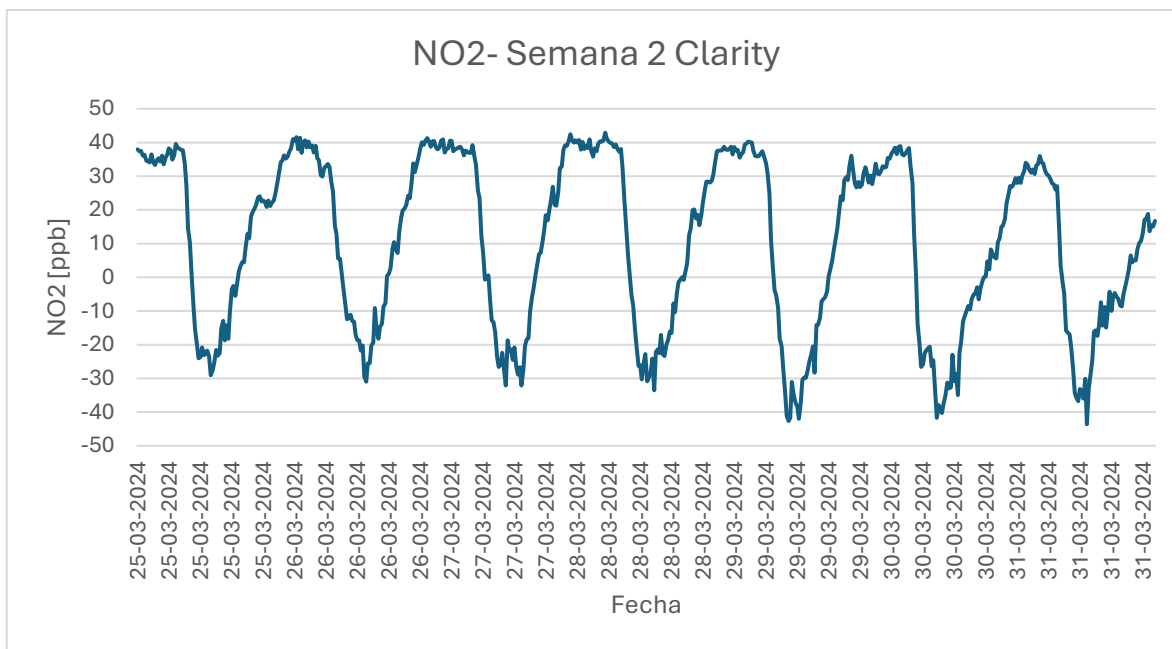


Gráfico 50: Mediciones cada 15 minutos del NO₂ del dispositivo Clarity de la Semana 2.

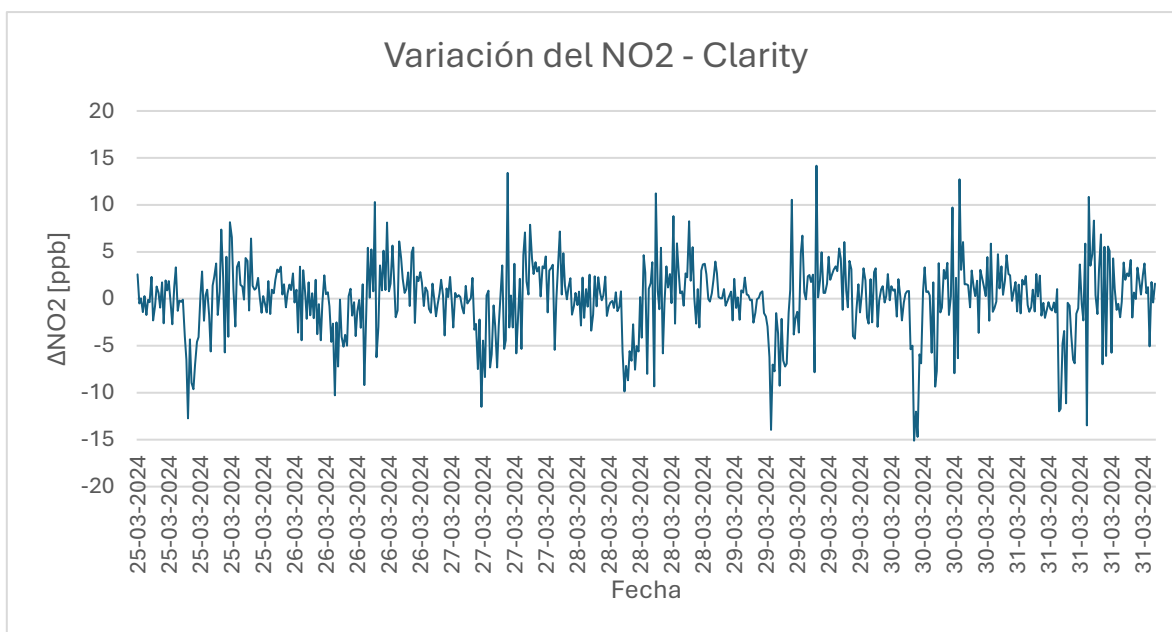


Gráfico 51: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO₂ del dispositivo Clarity de la Semana 2.

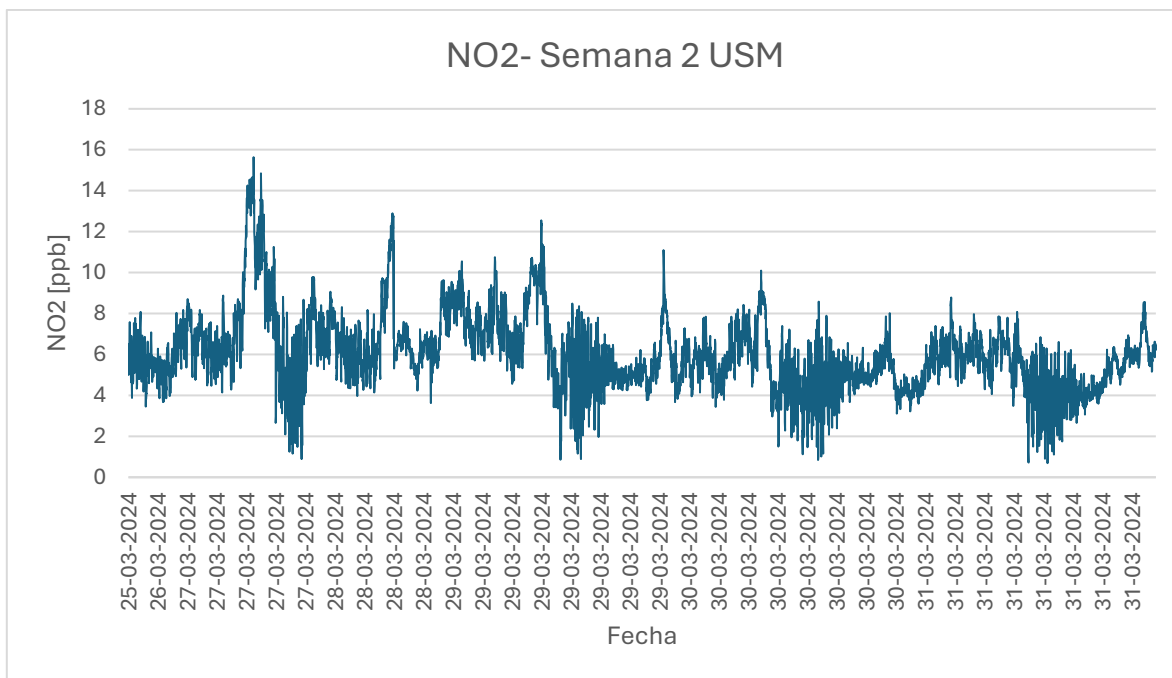


Gráfico 52: Mediciones cada 1 minuto del NO₂ del dispositivo USM de la Semana 2.

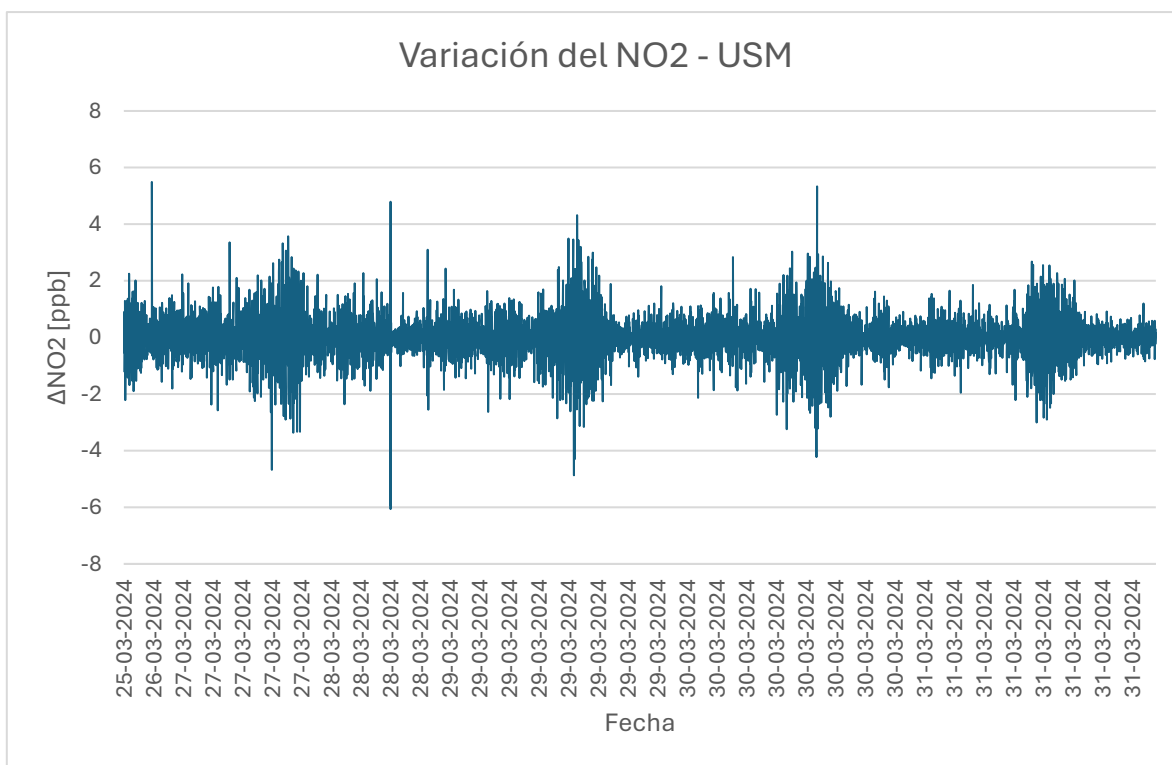


Gráfico 53: Variaciones de las mediciones de 1 minuto del NO₂ del dispositivo USM de la Semana 1.

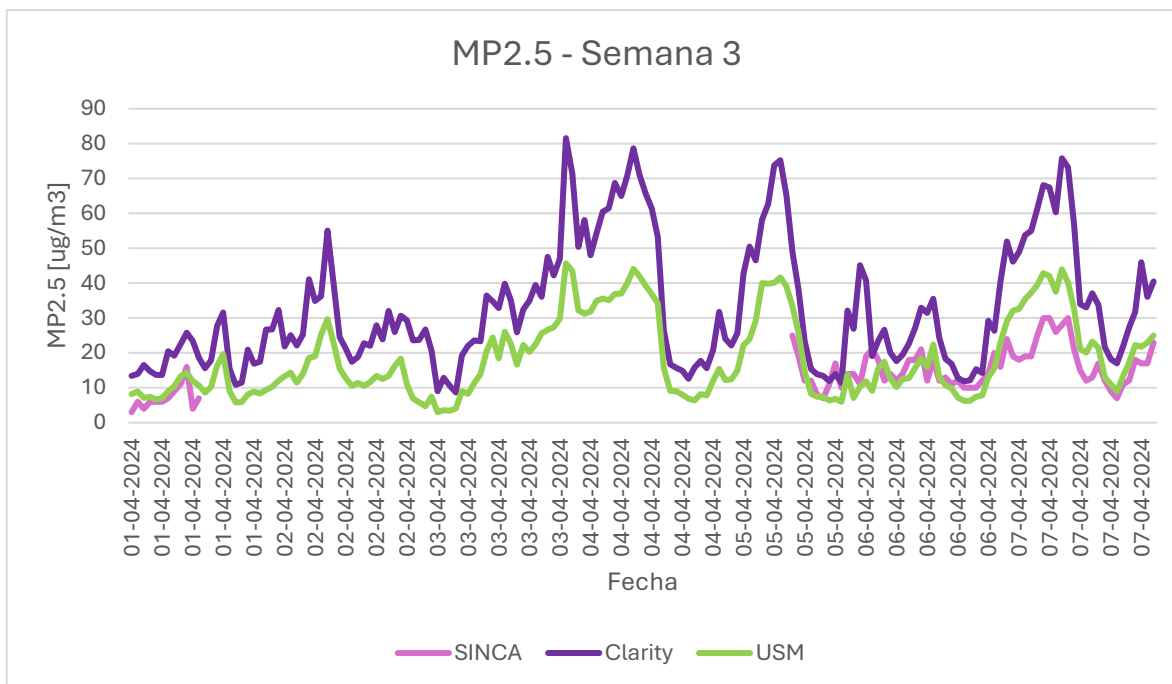


Gráfico 54: Datos horarios del MP2.5 extraídos de los dispositivos SINCA, Clarity y USM de la Semana 3.

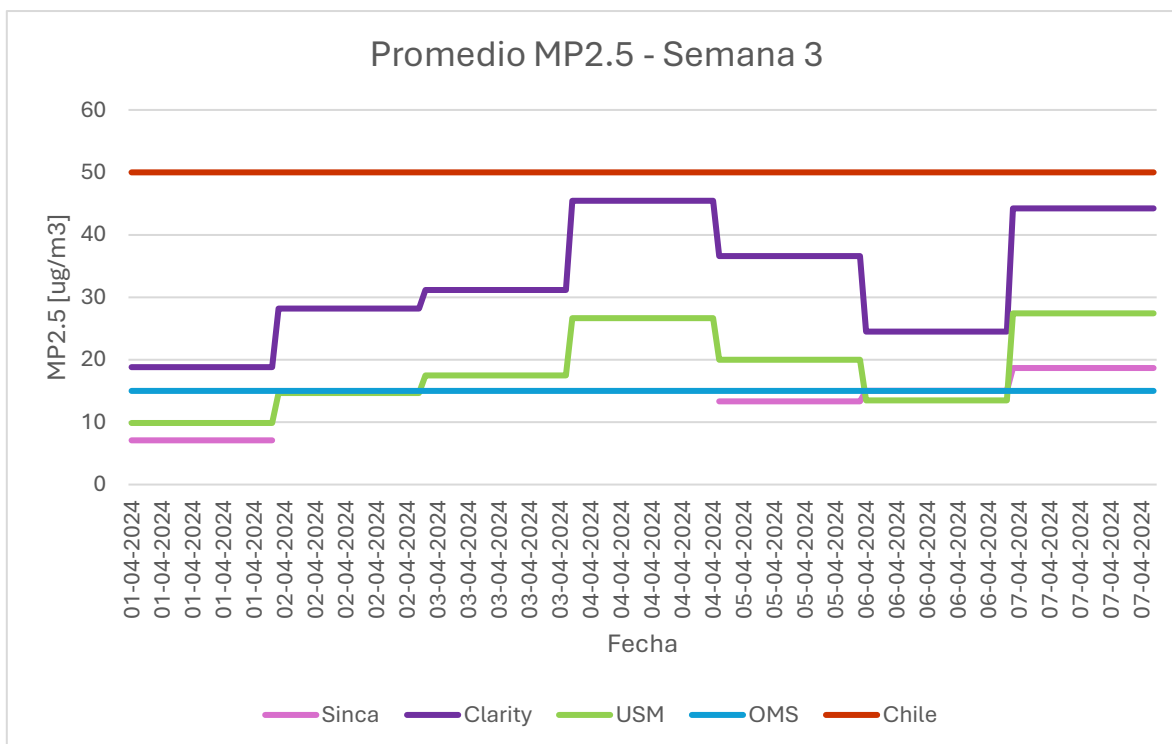
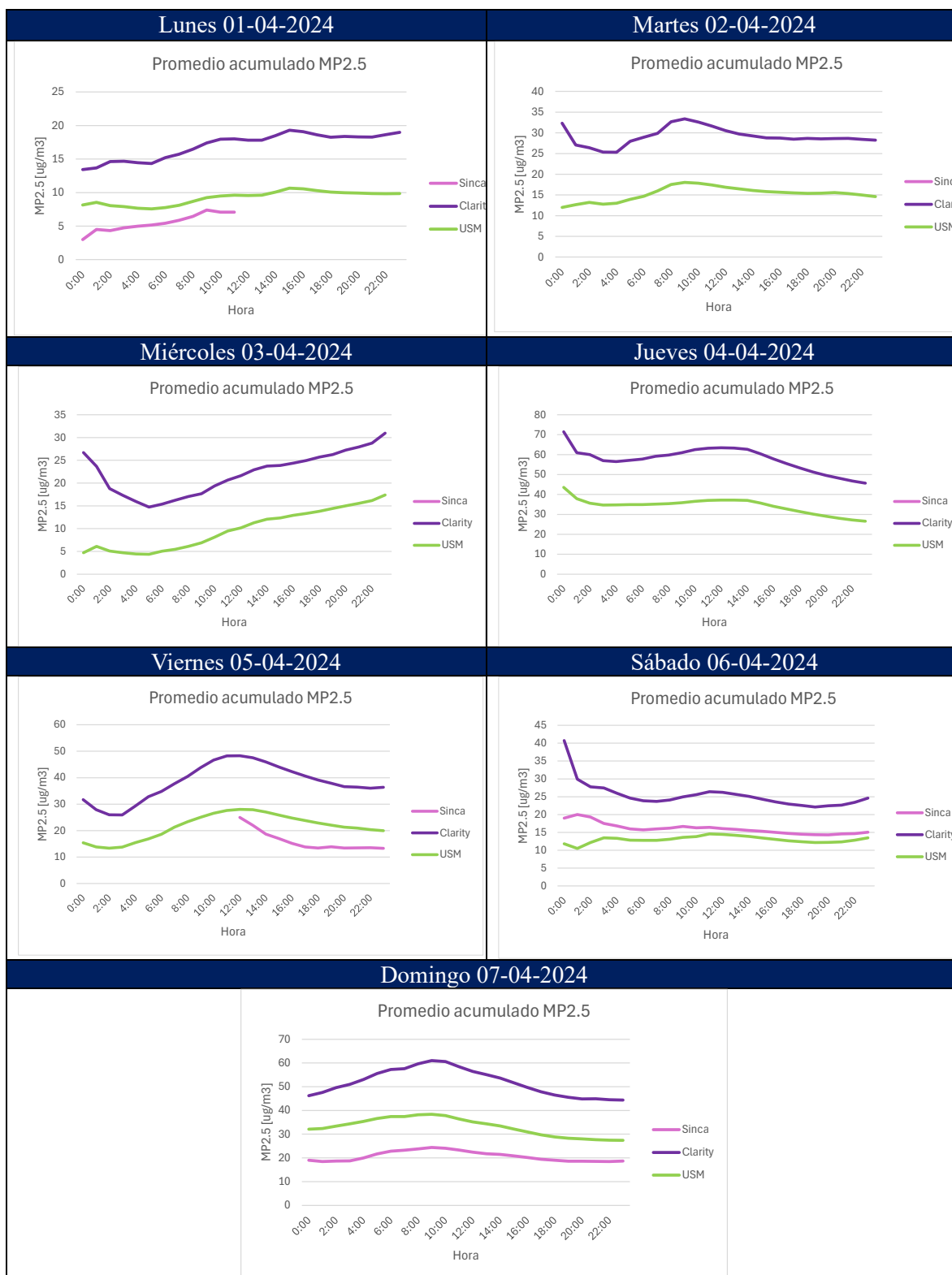


Gráfico 55: Promedios diarios del MP2.5 de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 3, en conjunto con las normas diarias de la OMS y chilena.

Tabla 54: Promedio acumulado horario del MP2.5 de cada día de los dispositivos SINCA, Clarity y USM, correspondiente a la Semana 3.



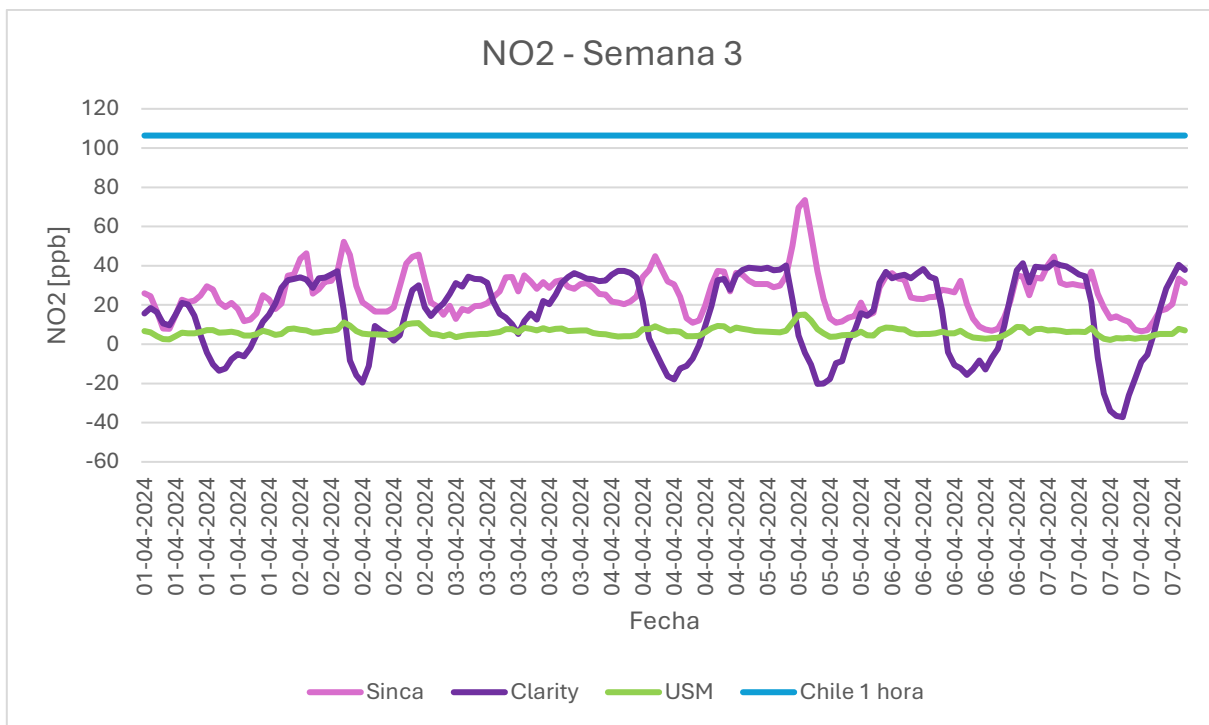


Gráfico 56: Datos horarios del NO₂ extraídos de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 3, en conjunto a la norma horaria chilena.

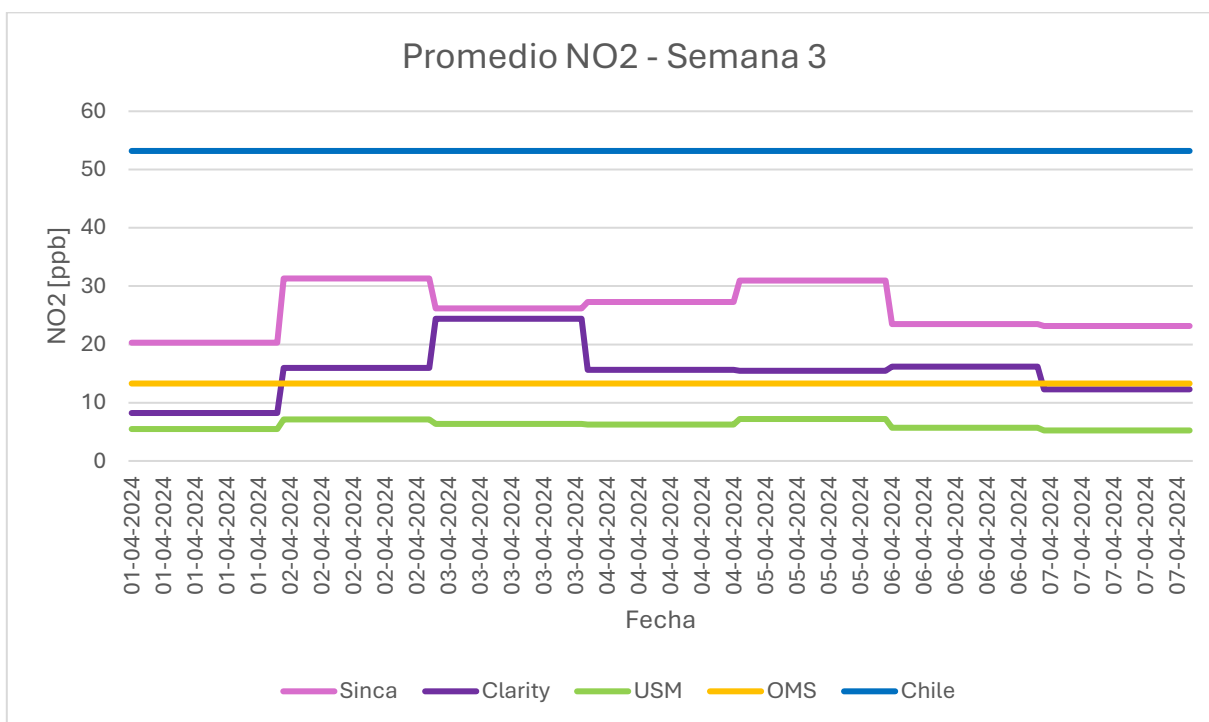
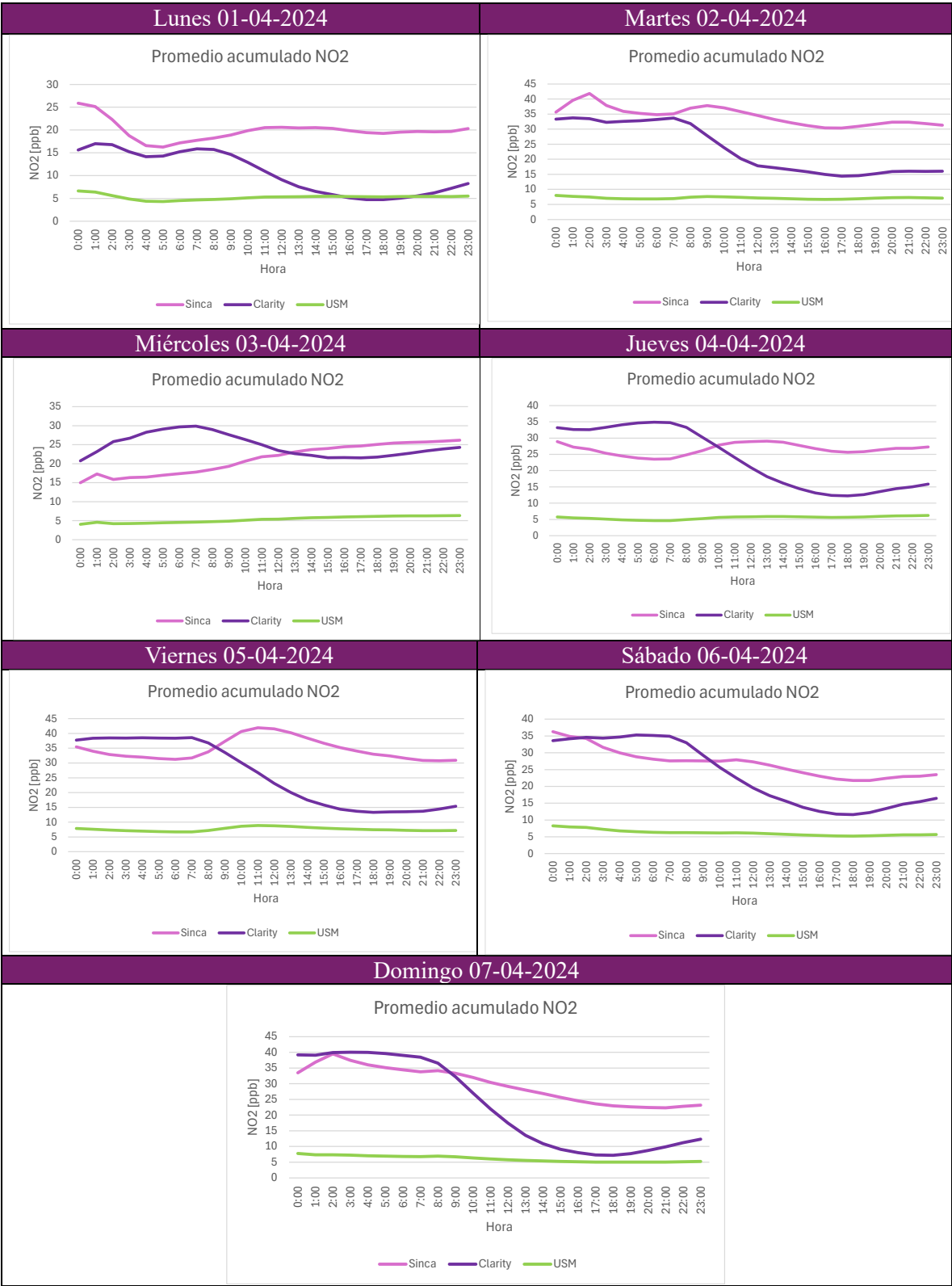


Gráfico 57: Promedios diarios del NO₂ de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 3, en conjunto con las normas diarias de la OMS y chilena.

Tabla 55: Promedios acumulados horarios del NO2 de los dispositivos SINCA, Clarity y USM correspondiente a la Semana 3.



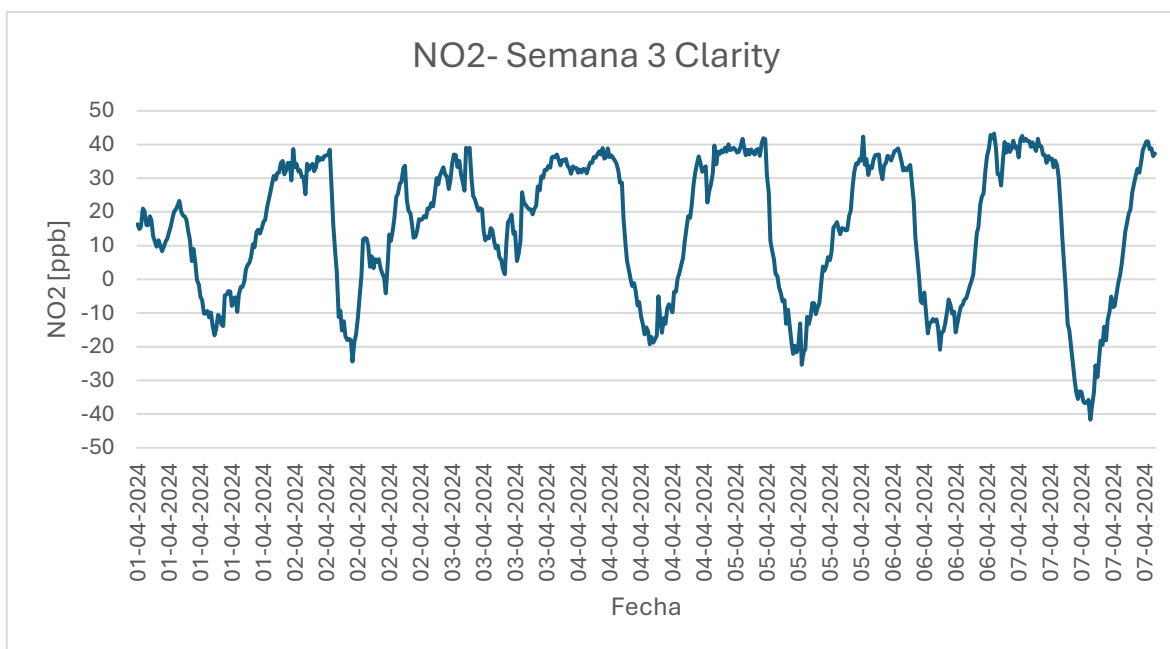


Gráfico 58: Mediciones cada 15 minutos del NO₂ del dispositivo Clarity de la Semana 3.

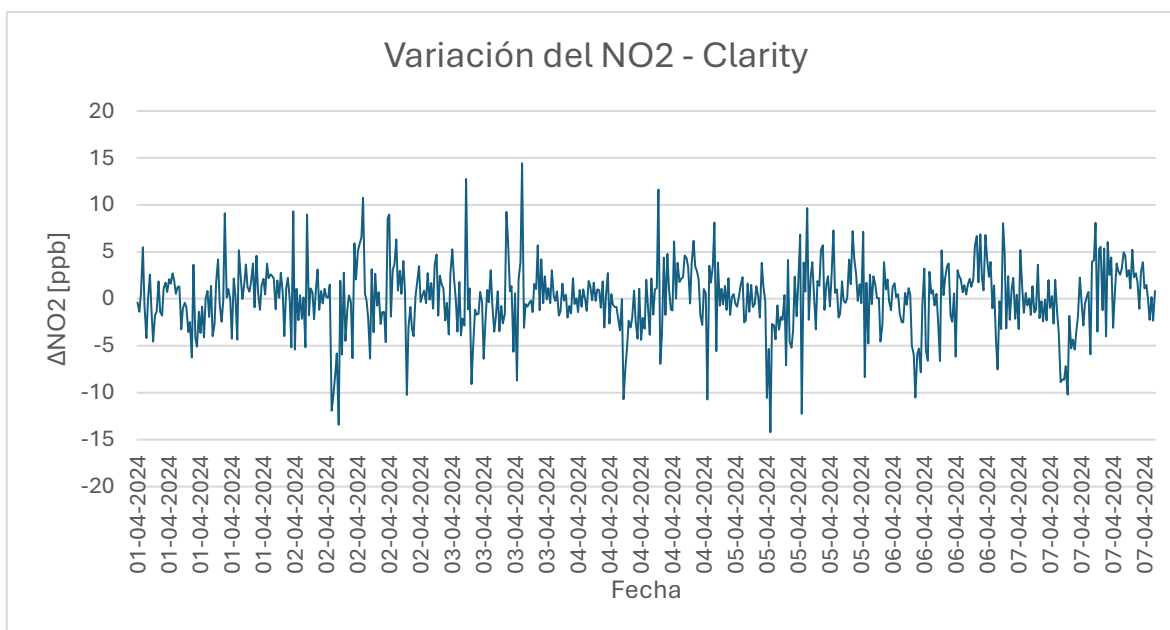


Gráfico 59: Variaciones de las mediciones de 15 minutos del NO₂ del dispositivo Clarity de la Semana 3.

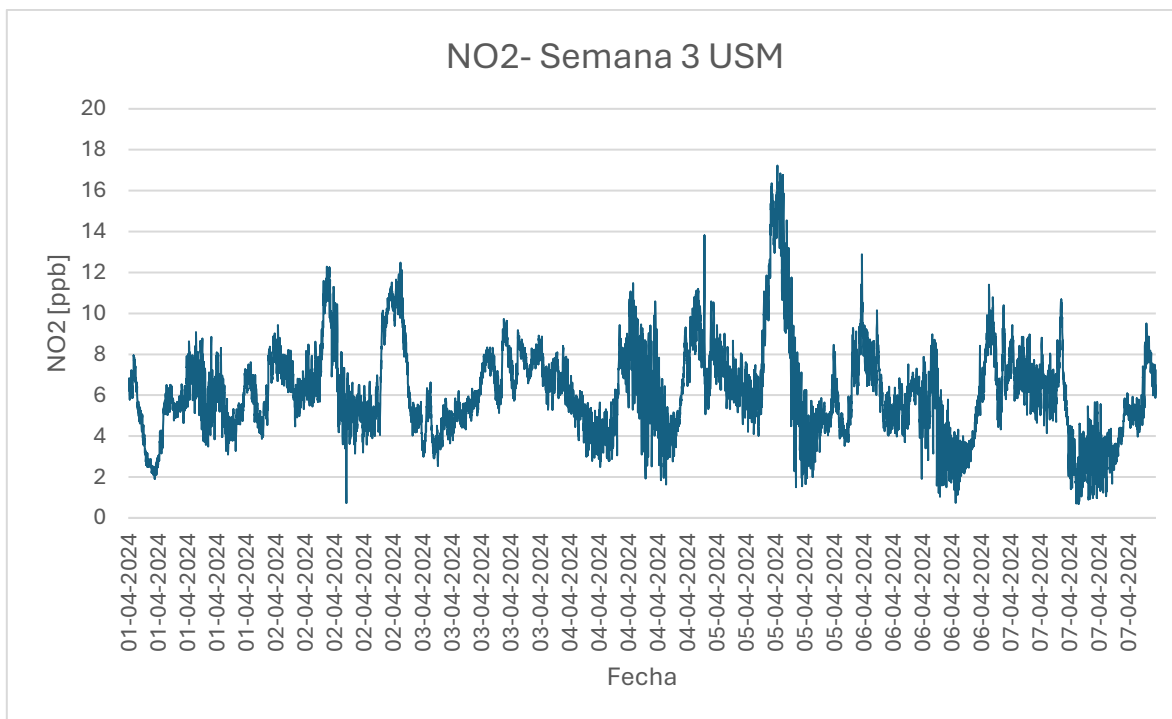


Gráfico 60: Mediciones cada 1 minuto del NO₂ del dispositivo USM de la Semana 3.

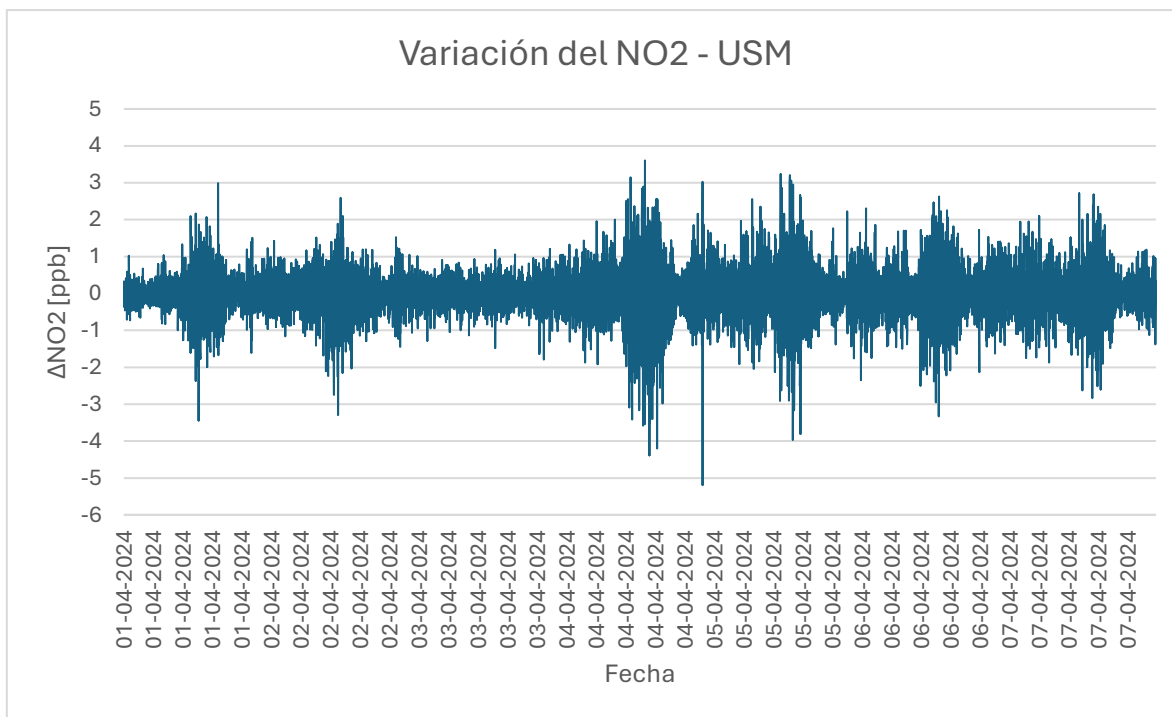


Gráfico 61: Variaciones de las mediciones de 1 minuto del NO₂ del dispositivo USM de la Semana 3.

Anexo B

Tabla 56: Error del promedio acumulado de 15 minutos con el promedio horario del NO₂.

16-12-2024 0:14	-3%	17-12-2024 0:16	-5%	18-12-2024 0:00	8%	19-12-2024 0:01	-7%	20-12-2024 0:01	0%	21-12-2024 0:00	-8%	22-12-2024 0:01	-12%
16-12-2024 0:32	-1%	17-12-2024 0:33	-1%	18-12-2024 0:18	4%	19-12-2024 0:18	-3%	20-12-2024 0:18	-4%	21-12-2024 0:18	-3%	22-12-2024 0:18	-6%
16-12-2024 0:49	0%	17-12-2024 0:50	0%	18-12-2024 0:35	2%	19-12-2024 0:36	-1%	20-12-2024 0:36	-2%	21-12-2024 0:35	-1%	22-12-2024 0:36	-2%
16-12-2024 1:07	4%	17-12-2024 1:08	-7%	18-12-2024 0:52	0%	19-12-2024 0:53	0%	20-12-2024 0:53	0%	21-12-2024 0:53	0%	22-12-2024 0:53	0%
16-12-2024 1:24	1%	17-12-2024 1:25	-3%	18-12-2024 1:10	3%	19-12-2024 1:10	-4%	20-12-2024 1:10	-17%	21-12-2024 1:10	1%	22-12-2024 1:11	-2%
16-12-2024 1:41	0%	17-12-2024 1:43	0%	18-12-2024 1:27	0%	19-12-2024 1:28	-2%	20-12-2024 1:28	-5%	21-12-2024 1:27	1%	22-12-2024 1:28	-1%
16-12-2024 1:59	0%	17-12-2024 2:00	4%	18-12-2024 1:44	0%	19-12-2024 1:45	0%	20-12-2024 1:45	0%	21-12-2024 1:45	0%	22-12-2024 1:45	0%
16-12-2024 2:16	2%	17-12-2024 2:17	5%	18-12-2024 2:02	-2%	19-12-2024 2:02	1%	20-12-2024 2:02	-7%	21-12-2024 2:02	0%	22-12-2024 2:03	1%
16-12-2024 2:33	3%	17-12-2024 2:35	3%	18-12-2024 2:19	-4%	19-12-2024 2:20	2%	20-12-2024 2:20	-4%	21-12-2024 2:19	-1%	22-12-2024 2:26	0%
16-12-2024 2:51	0%	17-12-2024 2:52	0%	18-12-2024 2:37	-1%	19-12-2024 2:37	3%	20-12-2024 2:37	-1%	21-12-2024 2:37	0%	22-12-2024 3:50	0%
16-12-2024 3:08	-2%	17-12-2024 3:09	1%	18-12-2024 2:54	0%	19-12-2024 2:54	0%	20-12-2024 2:54	0%	21-12-2024 2:54	0%	22-12-2024 4:07	-1%
16-12-2024 3:25	-1%	17-12-2024 3:27	1%	18-12-2024 3:11	-1%	19-12-2024 3:12	-21%	20-12-2024 3:12	-4%	21-12-2024 3:12	-1%	22-12-2024 4:25	0%
16-12-2024 3:43	0%	17-12-2024 3:44	0%	18-12-2024 3:29	-3%	19-12-2024 3:29	-3%	20-12-2024 3:29	-1%	21-12-2024 3:29	0%	22-12-2024 4:42	0%
16-12-2024 4:00	-2%	17-12-2024 4:02	1%	18-12-2024 3:46	0%	19-12-2024 3:47	0%	20-12-2024 3:46	0%	21-12-2024 3:46	0%	22-12-2024 5:00	-5%
16-12-2024 4:18	-1%	17-12-2024 4:19	0%	18-12-2024 4:04	-1%	19-12-2024 4:04	-1%	20-12-2024 4:04	4%	21-12-2024 4:04	2%	22-12-2024 5:17	-2%
16-12-2024 4:35	-1%	17-12-2024 4:36	0%	18-12-2024 4:21	-1%	19-12-2024 4:21	9%	20-12-2024 4:21	4%	21-12-2024 4:21	0%	22-12-2024 5:34	-1%
16-12-2024 4:52	0%	17-12-2024 4:54	0%	18-12-2024 4:38	-1%	19-12-2024 4:39	1%	20-12-2024 4:38	3%	21-12-2024 4:39	0%	22-12-2024 5:52	0%
16-12-2024 5:10	-3%	17-12-2024 5:11	0%	18-12-2024 4:56	0%	19-12-2024 4:56	0%	20-12-2024 4:56	0%	21-12-2024 4:56	0%	22-12-2024 6:09	1%
16-12-2024 5:27	-2%	17-12-2024 5:29	0%	18-12-2024 5:13	1%	19-12-2024 5:13	-5%	20-12-2024 5:13	-9%	21-12-2024 5:13	-1%	22-12-2024 6:26	1%
16-12-2024 5:45	0%	17-12-2024 5:46	0%	18-12-2024 5:30	-1%	19-12-2024 5:31	1%	20-12-2024 5:30	-3%	21-12-2024 5:31	-1%	22-12-2024 6:44	0%
16-12-2024 6:02	-1%	17-12-2024 6:03	0%	18-12-2024 5:48	0%	19-12-2024 5:48	0%	20-12-2024 5:48	0%	21-12-2024 5:48	0%	22-12-2024 7:01	2%
16-12-2024 6:19	0%	17-12-2024 6:21	-1%	18-12-2024 6:05	-2%	19-12-2024 6:05	40%	20-12-2024 6:05	0%	21-12-2024 6:05	0%	22-12-2024 7:18	3%
16-12-2024 6:37	0%	17-12-2024 6:38	-1%	18-12-2024 6:22	-1%	19-12-2024 6:23	-3%	20-12-2024 6:22	0%	21-12-2024 6:23	0%	22-12-2024 7:36	4%
16-12-2024 6:54	0%	17-12-2024 6:56	0%	18-12-2024 6:40	-1%	19-12-2024 6:40	-19%	20-12-2024 6:40	0%	21-12-2024 6:40	1%	22-12-2024 7:53	0%
16-12-2024 7:11	1%	17-12-2024 7:13	-1%	18-12-2024 6:57	0%	19-12-2024 6:57	0%	20-12-2024 6:57	0%	21-12-2024 6:58	0%	22-12-2024 8:10	22%
16-12-2024 7:29	0%	17-12-2024 7:30	-2%	18-12-2024 7:14	-2%	19-12-2024 7:15	-21%	20-12-2024 7:14	2%	21-12-2024 7:15	4%	22-12-2024 8:28	7%
16-12-2024 7:46	0%	17-12-2024 7:48	0%	18-12-2024 7:32	-1%	19-12-2024 7:32	-11%	20-12-2024 7:32	2%	21-12-2024 7:32	1%	22-12-2024 8:45	0%
16-12-2024 8:04	6%	17-12-2024 8:05	5%	18-12-2024 7:49	0%	19-12-2024 7:49	0%	20-12-2024 7:49	0%	21-12-2024 7:50	0%	22-12-2024 9:03	-41%
16-12-2024 8:21	6%	17-12-2024 8:22	2%	18-12-2024 8:06	13%	19-12-2024 8:07	26%	20-12-2024 8:07	11%	21-12-2024 8:07	17%	22-12-2024 9:20	-29%
16-12-2024 8:38	3%	17-12-2024 8:40	2%	18-12-2024 8:24	6%	19-12-2024 8:24	16%	20-12-2024 8:24	7%	21-12-2024 8:24	11%	22-12-2024 9:37	-8%
16-12-2024 8:56	0%	17-12-2024 8:57	0%	18-12-2024 8:41	2%	19-12-2024 8:41	8%	20-12-2024 8:41	4%	21-12-2024 8:42	4%	22-12-2024 9:55	0%
16-12-2024 9:13	-2%	17-12-2024 9:15	-8%	18-12-2024 8:59	0%	19-12-2024 8:59	0%	20-12-2024 8:59	0%	21-12-2024 8:59	0%	22-12-2024 10:12	5%
16-12-2024 9:30	-3%	17-12-2024 9:32	-1%	18-12-2024 9:16	-9%	19-12-2024 9:16	-38%	20-12-2024 9:16	-3%	21-12-2024 9:16	-13%	22-12-2024 10:29	-3%
16-12-2024 9:48	0%	17-12-2024 9:50	0%	18-12-2024 9:33	-5%	19-12-2024 9:34	-25%	20-12-2024 9:33	-2%	21-12-2024 9:34	-9%	22-12-2024 10:47	0%
16-12-2024 10:05	8%	17-12-2024 10:07	-1%	18-12-2024 9:51	0%	19-12-2024 9:51	0%	20-12-2024 9:51	0%	21-12-2024 9:51	0%	22-12-2024 11:04	-13%
16-12-2024 10:23	5%	17-12-2024 10:25	3%	18-12-2024 10:08	4%	19-12-2024 10:08	4%	20-12-2024 10:08	7%	21-12-2024 10:08	5%	22-12-2024 11:21	-7%
16-12-2024 10:40	4%	17-12-2024 10:42	2%	18-12-2024 10:25	0%	19-12-2024 10:26	4%	20-12-2024 10:25	3%	21-12-2024 10:26	4%	22-12-2024 11:39	-4%
16-12-2024 10:57	0%	17-12-2024 10:59	0%	18-12-2024 10:43	0%	19-12-2024 10:43	0%	20-12-2024 10:43	0%	21-12-2024 10:43	0%	22-12-2024 11:56	0%
16-12-2024 11:15	10%	17-12-2024 11:17	2%	18-12-2024 11:00	1%	19-12-2024 11:00	18%	20-12-2024 11:00	-2%	21-12-2024 11:01	-1%	22-12-2024 12:13	26%
16-12-2024 11:32	9%	17-12-2024 11:34	3%	18-12-2024 11:18	-1%	19-12-2024 11:18	15%	20-12-2024 11:17	-6%	21-12-2024 11:18	-7%	22-12-2024 12:31	18%
16-12-2024 11:49	0%	17-12-2024 11:52	0%	18-12-2024 11:35	-1%	19-12-2024 11:35	0%	20-12-2024 11:35	-5%	21-12-2024 11:35	-7%	22-12-2024 12:48	0%
16-12-2024 12:07	-19%	17-12-2024 12:09	8%	18-12-2024 11:52	0%	19-12-2024 11:52	0%	20-12-2024 11:52	0%	21-12-2024 11:53	0%	22-12-2024 13:06	-7%
16-12-2024 12:24	-9%	17-12-2024 12:26	3%	18-12-2024 12:10	-19%	19-12-2024 12:10	32%	20-12-2024 12:10	8%	21-12-2024 12:10	8%	22-12-2024 13:23	20%
16-12-2024 12:42	-4%	17-12-2024 12:44	0%	18-12-2024 12:27	-5%	19-12-2024 12:27	24%	20-12-2024 12:27	8%	21-12-2024 12:27	0%	22-12-2024 13:40	20%
16-12-2024 12:59	0%	17-12-2024 13:01	13%	18-12-2024 12:44	0%	19-12-2024 12:45	0%	20-12-2024 12:44	0%	21-12-2024 12:45	0%	22-12-2024 13:58	0%
16-12-2024 13:16	6%	17-12-2024 13:18	4%	18-12-2024 13:02	-69%	19-12-2024 13:02	29%	20-12-2024 13:02	-14%	21-12-2024 13:02	7%	22-12-2024 14:15	-76%
16-12-2024 13:34	7%	17-12-2024 13:35	-1%	18-12-2024 13:19	5%	19-12-2024 13:19	26%	20-12-2024 13:19	-5%	21-12-2024 13:19	8%	22-12-2024 14:32	-13%
16-12-2024 13:51	0%	17-12-2024 13:53	0%	18-12-2024 13:37	4%	19-12-2024 13:37	-11%	20-12-2024 13:36	5%	21-12-2024 13:37	-6%	22-12-2024 14:50	0%
16-12-2024 14:09	-1%	17-12-2024 14:10	20%	18-12-2024 13:54	0%	19-12-2024 13:54	0%	20-12-2024 13:53	0%	21-12-2024 13:54	0%	22-12-2024 15:07	9%
16-12-2024 14:26	7%	17-12-2024 14:28	4%	18-12-2024 14:11	-2%	19-12-2024 14:11	35%	20-12-2024 14:11	0%	21-12-2024 14:11	16%	22-12-2024 15:24	-5%
16-12-2024 14:43	0%	17-12-2024 14:45	0%	18-12-2024 14:29	-7%	19-12-2024 14:29	13%	20-12-2024 14:28	-4%	21-12-2024 14:29	12%	22-12-2024 15:42	-13%
16-12-2024 15:00	12%	17-12-2024 15:02	13%	18-12-2024 14:46	0%	19-12-2024 14:46	0%	20-12-2024 14:46	0%	21-12-2024 14:46	0%	22-12-2024 15:59	0%
16-12-2024 15:18	-11%	17-12-2024 15:20	9%	18-12-2024 15:03	-17%	19-12-2024 15:03	26%	20-12-2024 15:03	17%	21-12-2024 15:03	25%	22-12-2024 16:16	-18%
16-12-2024 15:35	-3%	17-12-2024 15:37	5%	18-12-2024 15:21	-4%	19-12-2024 15:21	23%	20-12-2024 15:20	9%	21-12-2024 15:21	9%	22-12-2024 16:33	-6%
16-12-2024 15:53	0%	17-12-2024 15:54	0%	18-12-2024 15:38	6%	19-12-2024 15:38	14%	20-12-2024 15:38	0%	21-12-2024 15:38	1%	22-12-2024 16:51	0%
16-12-2024 16:10	4%	17-12-2024 16:12	-4%	18-12-2024 15:55	0%	19-12-2024 15:55	0%	20-12-2024 15:55	0%	21-12-2024 15:55	0%	22-12-2024 17:08	24%
16-12-2024 16:28	-8%	17-12-2024 16:29	-1%	18-12-2024 16:13	23%	19-12-2024 16:13	-15%	20-12-2024 16:12	37%	21-12-2024 16:13	-14%	22-12-2024 17:25	17%
16-12-2024 16:45	0%	17-12-2024 16:46	0%	18-12-2024 16:30	-1%	19-12-2024 16:30	-2%	20-12-2024 16:29	-26%	21-12-2024 16:30	-2%	22-12-2024 17:43	0%
16-12-2024 17:02	15%	17-12-2024 17:04	8%	18-12-2024 16:47	0%	19-12-2024 16:48	0%	20-12-2024 16:47	0%	21-12-2024 16:47	0%	22-12-2024 18:00	-65%
16-12-2024 17:19	5%	17-12-2024 17:21	6%	18-12-2024 17:05	-53%	19-12-2024 17:05	27%	20-12-2024 17:04	-13%	21-12-2024 17:05	21%	22-12-2024 18:17	-13%
16-12-2024 17:37	4%	17-12-2024 17:38	5%	18-12-2024 17:22	-50%	19-12-2024 17:22	19%	20-12-2024 17:21	-61%	21-12-2024 17:22	12%	22-12-2024 18:35	-8%
16-12-2024 17:54	0%	17-12-2024 17:56	0%	18-12-2024 17:39	-14%	19-12-2024 17:40	-5%	20-12-2024 17:39	-23%	21-12-2024 17:40	6%	22-12-2024 18:52	0%
16-12-2024 18:12	3%	17-12-2024 18:13	4%	18-12-2024 17:57	0%	19-12-2024 17:57	0%	20-12-2024 17:56	0%	21-12-2024 17:57	0%	22-12-2024 19:09	1%
16-12-2024 18:29	5%	17-12-2024 18:30	3%	18-12-2024 18:14	19%	19-12-2024 18:14	5%	20-12-2024 18:13	20%	21-12-2024 18:14	14%	22-12-2024 19:27	-