Volumen I

INFORME FINAL. Revisión 1

Licitación ID: 608897-7 LE20

"Caracterización del Factor Meteorológico para Calidad del Aire y Categorización de las Condiciones de Ventilación para las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví"

Preparada para: **Gobierno de Chile**
Ministerio del Medio Ambiente
Subsecretaría del Medio Ambiente

Por: ***AMBIMET®***
Área Servicios Ambientales

Santiago, 10 de Diciembre de 2020

AMBIMET® LTDA - Garibaldi Nº 1620 – Ñuñoa – CP 777-0125 - Santiago - CHILE
Fonos (+56-2) 22744798 y 23416980 – Email: ambimet@ambimet.cl - Web: www.ambimet.cl

INFORME FINAL. Revisión 1

Licitación ID: 608897-7 LE20

"Caracterización del Factor Meteorológico para Calidad del Aire y Categorización de las Condiciones de Ventilación para las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví"

Preparada para: **Gobierno de Chile**
Ministerio del Medio Ambiente
Subsecretaría del Medio Ambiente

Por: ***AMBIMET®***
Área Servicios Ambientales

CÓDIGO	REVISIÓN	ELABORADO	FECHA	REVISADO	APROBADO	FECHA	COMENTARIOS
AMB 172-21	B	Manuel Merino ErwinAlegría Maureen Amín Gerardo Alvarado Francisco Jimenez Vicente Valdés José García	10/12/20	Maureen Amín Gerardo Alvarado Vicente Valdés José García	Manuel Merino Erwin Alegría	10/12/20	

Santiago, 10 de Diciembre de 2020

CONTENIDO DEL INFORME FINAL:

1 Introducción 1

2 Producto i: Análisis sobre la calidad de la información meteorológica (superficie y altura disponible) y de calidad del aire, y su potencial uso con fines de pronóstico de las condiciones de ventilación para calidad del aire 3

2.1 Información a utilizar y metodología de análisis 3

2.1.1 Datos de meteorología y calidad de aire en estaciones de superficie 3

2.1.2 Datos meteorológicos de altura escala regional 9

2.2 Evaluar la calidad de la información meteorológica (de superficie y de altura) y de la calidad del aire disponible en la zona con fines de pronóstico de ventilación 10

2.2.1 Resultados de visualización inicial de datos de estaciones de superficie 10

2.2.2 Resultados de análisis de consistencia espacial y temporal de datos de estaciones de superficie 12

2.2.3 Representatividad de estaciones de superficie 13

2.2.4 Confección de Base de Datos Revisada 16

2.3 Potencial uso de la Información con fines de pronóstico de las condiciones de ventilación para Calidad del Aire 17

3 Producto ii: Sugerencias sobre la medición de nueva información meteorológica y sus costos de implementación y operación 18

3.1 Justificación de sugerencias para nueva información meteorológica 18

3.2 Propuesta de mejoramiento a la red de estaciones de superficie 19

3.2.1 Mejoras en las Actuales Estaciones Meteorológicas 19

3.2.2 Mejoramiento Torre Meteorológica Principal 22

3.2.3 Estación Meteorológica en zona Norte con fines de vigilancia y pronóstico 27

3.3 Propuestas para mejoramiento de la información meteorológica en altura 29

3.3.1 Estación Meteorológica en Altura Geográfica 29

3.3.2 Campaña Globo cautivos 32

3.3.3 Perfilador Vertical 34

3.3.4 Recomendaciones 39

3.4 Cámaras de Vigilancia 39

4 Producto iii de BT: Caracterización de la estructura vertical de la atmósfera con identificación de la estabilidad superficial y regional, y su efecto en el ciclo diario y/o estacional del transporte de contaminantes. 42

4.1 Conceptos Generales 42
4.1.1 Escalas de los fenómenos meteorológicos 42
4.1.2 Estabilidad a escala regional 43
4.1.3 Estabilidad a escala local 44
4.2 Datos y métodos 45
4.2.1 Radiosonda de Santo Domingo 45
4.2.2 Torre meteorológica Principal 48
4.2.3 Otros datos utilizados 51
4.3 Resultados para la estabilidad regional 51
4.3.1 Presentación de Configuraciones Sinópticas 51
4.3.2 Características perfiles verticales medios 52
4.3.3 Comportamiento inversión térmica 54
4.4 Resultados para la estabilidad superficial 57
4.4.1 Condición de estabilidad local 57
4.4.2 Concentraciones de SO_2 y días con inversión térmica radiativa nocturna 58
4.4.3 Ciclo diario de la estabilidad superficial 61
4.4.4 Ciclo estacional de la estabilidad superficial 62
4.4.5 Condiciones de calidad de aire a escala regional 63
4.4.6 Comportamiento vertical de la atmósfera y la estabilidad según configuración sinóptica para período frío y cálido 64
4.4.7 Concentraciones diarias de SO_2 para estaciones de calidad del aire según configuración sinóptica en período frío y cálido considerando outliers 69
5 Producto iv de BT: Clasificación de los fenómenos meteorológicos a distintas escalas, su frecuencia de ocurrencia y su relación con el desarrollo de eventos de aumento de concentraciones de contaminantes atmosféricos 72
5.1 Conceptos generales configuraciones meteorológicas a escalas sinóptica y mesoescala o regional 72
5.1.1 Vaguadas Costeras, Episodios Tipo A y BPF 72
5.1.2 Sistemas frontales 74
5.1.3 Sistemas frontales en altura 74
5.1.4 Altas frías migratorias 74
5.1.5 Bajas segregadas o núcleos fríos en altura 74
5.2 Datos y métodos 75

5.2.1 Datos e información meteorológica para identificar las configuraciones sinópticas y de mesoescala 75
5.2.2 Metodología 78
5.2.3 Identificación y clasificación de Configuraciones sinópticas y mesosescala 78
5.2.4 Uso de Boxplot para identificar parámetros significativos del radiosonda en las distintas configuraciones sinópticas 78
5.3 Resultados de configuraciones sinópticas y de mesoescala 79
5.3.1 Configuraciones sinópticas y mesoescala en la zona de estudio para todo el periodo 79
5.3.2 Distribución mensual de Configuraciones sinópticas y mesoescala en la zona de estudio 80
5.3.3 Parámetros de superficie y altura asociados a las distintas configuraciones 81
5.3.4 Concentraciones horarias de $SO_2 \geq 500$ µg/m³N y $SO_2 \geq 350$ µg/m³N 91
6 Producto v de BT: Identificación de las variables meteorológicas y su relación con la ocurrencia de eventos de incrementos de las concentraciones de contaminantes 102
6.1 Datos y métodos 102
6.2 Resultados identificación de variables meteorológicas 102
6.2.1 Estaciones con mayores concentraciones horarias de SO_2 102
6.2.2 Ciclos diarios promedios de SO_2 104
6.2.3 Ciclo diario y estacional de concentraciones horarias de SO_2 v/s la diferencia de temperatura entre 40 y 10m 106
6.2.4 Mapa ubicación estaciones y fuentes principales de emisión 113
6.2.5 Rosas de viento según las configuraciones meteorológicas 114
6.2.6 Ciclo interanual, anual y diario promedio mediante Rosas de concentración de SO_2 116
6.2.7 Ciclo interanual, anual y diario de concentración de MP2,5 124
6.2.8 Ciclo diario mensual conjunto para SO_2 y MP2,5 v/s magnitud del viento 134
6.3 Resumen General del comportamiento del SO_2 y los rangos de variación de variables relevantes 139
7 Producto vi. Categorización de las condiciones de ventilación en términos de "Bueno, Regulares y Malas" 142
7.1 Datos y métodos 142
7.1.1 Factor de ventilación 142
7.1.2 Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA) 144

7.1.3 Características de la pluma o penacho, en función de la estabilidad a niveles bajos 145

7.2 Categorización de las Condiciones de Ventilación, el Factor Meteorológico en términos de “Bueno, Regulares y Malas” 147

7.3 Valores medios para aplicar en futura programación 155

7.4 Análisis de Episodios 160

8 Producto vii. Evaluación de las metodologías de pronóstico de calidad del aire revisadas. .. 162

8.1 Sistemas de pronóstico de calidad del aire 162

8.1.1 Sistemas de pronóstico en Chile 164

8.1.2 Sistemas de pronóstico a nivel internacional 166

8.2 Sistemas de pronóstico deeplearning 170

8.2.1 TensorFLow 172

8.3 Análisis de los sistemas de pronóstico 173

8.4 Conclusión 176

9 Producto viii. Resultados del ejercicio de modelación de calidad del aire con fines de pronóstico 177

9.1 Meteorología observada 177

9.2 Meteorología observada 177

9.3 Modelación meteorológica 178

9.3.1 Descripción del modelo WRF 178

9.3.2 Configuración del modelo WRF Ejercicio 1 179

9.3.3 Configuración del dominio de modelación 180

9.3.4 Resultados del modelo meteorológico 183

9.3.5 Análisis de Resultados del modelo meteorológico 199

9.3.6 Análisis y Configuración del modelo WRF Ejercicio 2 200

9.4 Modelación de calidad del aire 201

9.4.1 Justificación modelo calidad del aire 201

9.4.2 Descripción del modelo calidad del aire 201

9.5 Inventario de emisiones 204

9.5.1 Resultados de modelación de calidad del aire 210

9.6 Conclusiones 220

10 Producto ix. Resultados del análisis de la factibilidad técnica, costos de implementación y operación de las metodologías revisadas incluyendo los niveles de predictibilidad y porcentajes de acierto esperados 223

10.1 Implementación del Factor meteorológico 225

11 Producto x. Carpeta con presentaciones y resumen de las actividades desarrolladas durante el taller mediante registro fotográfico, ppt, entre otros 227

12 Conclusiones y recomendaciones 230

12.1 Producto i Análisis sobre la calidad de la información meteorológica (superficie y altura disponible) y de calidad del aire, y su potencial uso con fines de pronóstico de las condiciones de ventilación para calidad del aire 230

12.2 Producto ii Sugerencias sobre la medición de nueva información meteorológica y sus costos de implementación y operación 230

12.3 Productos iii Caracterización estructura vertical de atmósfera, iv Clasificación de los fenómenos meteorológicos a distintas escalas y v Identificación de las variables meteorológicas, Conclusiones a Escala Regional 232

12.4 Productos iii Caracterización estructura vertical de atmósfera, iv Clasificación de los fenómenos meteorológicos a distintas escalas y v Identificación de las variables meteorológicas, Conclusiones a Escala Local 234

12.5 Producto vi Categorización de las condiciones de ventilación 235

12.6 Producto vii Evaluación de las metodologías de pronóstico de calidad del aire 236

12.7 Producto viii Resultados del ejercicio de modelación 236

12.8 Producto ix Resultados del análisis de la factibilidad técnica, costos de implementación y operación de las metodologías revisadas 238

13 Bibliografía 239

14 Anexos 241

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Datos horarios de MP2,5; MP10 y SO_2 disponibles para el estudio, período 2010-2019... 4
Tabla 2-2 Datos horarios de variables meteorológicas disponibles para el estudio, período 2010-2019... 5
Tabla 2-3 Rangos de medición y rangos esperados para variables meteorológicas... 6
Tabla 2-4 Porcentaje de sondeos disponibles en el periodo 2016-2019 ... 9
Tabla 2-5 Porcentajes de datos horarios revisados de variables meteorológicas disponibles para el estudio, período 2010-2019 ... 16
Tabla 3-1Variables Meteorológicas por Estación de Monitoreo de Calidad de Aire y Meteorología ... 19
Tabla 3-2 Costos de implementación medición combinada de temperatura y humedad... 21
Tabla 3-3 Características Torre Meteorológica actual ... 22
Tabla 3-4 Torre Meteorológica con Distribución de Equipos Existentes Optimizada... 24
Tabla 3-5 Estimación de costo para mejoramiento de Torre Meteorológica ... 27
Tabla 3-6 Equipamiento y Costos para implementación de estación meteorológica en Pichidangui ... 28
Tabla 3-7 Altitud y distancias de referencia para puntos propuestos ... 30
Tabla 3-8 Equipamiento y Costos para implementación de estación meteorológica en altura ... 31
Tabla 3-9 Costo estimado de implementación de un sistema de globo cautivo ... 33
Tabla 3-10 Costo estimado de implementación de un Nefobasímetro ... 35
Tabla 3-11 Costo estimado de implementación del equipo WINDCUBE® ... 37
Tabla 3-12 Costo estimado de implementación del equipo LAP-RASS ... 38
Tabla 4-1Escalas temporales y espaciales de fenómenos meteorológicos ... 42
Tabla 4-2 Porcentaje de días para cada configuración sinóptica periodo frío y cálido, entre 2016 y 2019... 51
Tabla 5-1 Distribución mensual de configuraciones de escala sinóptica y mesoescala en el periodo 2016-2019 ... 80
Tabla 5-2 Configuraciones meteorológicas asociadas a concentraciones horarias ≥500 µg/m³N en el periodo 2016-2019 en Los Maitenes, Quintero y Concón ... 99
Tabla 5-3 Configuraciones meteorológicas asociadas a concentraciones horarias ≥350 µg/m³N en el periodo 2016-2019 en Los Maitenes, Quintero y Concón ... 99
Tabla 5-4 Horas del día y número de veces en que se superó el nivel de Alerta ≥500 µg/m³N en el periodo 2016-2019 en Los Maitenes, Quintero y Concón ... 100
Tabla 5-5 Horas del día y número de veces en que se superó el nivel de Alerta ≥500 µg/m³N en el periodo 2016-2019 en Los Maitenes, Quintero y Concón ... 100
Tabla 6-1 Escala clasificación del viento ... 132
Tabla 6-2 Rangos promedios observados en gráficos polares ciclo diario de SO_2... 133
Tabla 6-3 Rangos promedios observados en gráficos polares ciclo anual de SO_2 ... 133
Tabla 6-4 Rangos promedios observados en gráficos polares ciclo diario de MP2,5 ... 133
Tabla 6-5 Rangos promedios observados en gráficos polares ciclo anual de MP2,5... 134
Tabla 6-6 Comparación entre ciclos diarios mensuales de concentraciones de SO_2 y MP2,5 en función de la magnitud del viento ... 138

Tabla 6-7 Resumen comportamiento del SO_2 2016-2019 considerando los gráficos polares y otros datos de referencia 139
Tabla 7-1 Factor de ventilación FV 143
Tabla 7-2 Clasificación del Índice de Ventilación (FV) 143
Tabla 7-3 Rangos para Factor de ventilación 144
Tabla 7-4 Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA) 145
Tabla 7-5 Categorización del Factor Meteorológico en términos de “Bueno, Regulares y Malas”:148
Tabla 7-6 Valores medios variables relevantes del Estudio, Período Frío 156
Tabla 7-7 Valores medios variables relevantes del Estudio, Período Frío (Continuación) 157
Tabla 7-8 Valores medios variables relevantes del Estudio, Período Cálido 158
Tabla 7-9 Valores medios variables relevantes del Estudio, Período Cálido (Continuación)..... 159
Tabla 7-10 Análisis Episodios SO_2 horario ≥500 µg/m³N 160
Tabla 8-1 Sistemas de pronóstico implementados 162
Tabla 8-2 Características pronóstico operacional CPTEC 166
Tabla 8-3 Características pronóstico operacional CDMX 168
Tabla 8-4 modelos de pronóstico implementados en Estados Unidos 168
Tabla 8-5 Evaluación estadística modelo SAE Beijing 172
Tabla 8-6 Evaluación del pronóstico Calíope 175
Tabla 9-1 Estaciones de monitoreo 177
Tabla 9-2 Configuración modelo meteorológico 179
Tabla 9-3 Parametrización WRF 179
Tabla 9-4 Características dominio de modelación 180
Tabla 9-5 Estadígrafos de velocidad del viento (VV) para las estaciones Concón, Quintero y Los Maitenes 199
Tabla 9-6 Evaluación de desempeño del modelo para la variable magnitud del viento en las estaciones Concón, Quintero y Los Maitenes 199
Tabla 9-7 Factor de ajuste de magnitud del viento 200
Tabla 9-8 Características de las fuentes y tasas de emisión 206
Tabla 9-9 Estadígrafos de concentraciones SO_2µg /m³N para las estaciones Concón, Quintero y Los Maitenes 218
Tabla 9-10 Evaluación de desempeño del modelo para concentraciones SO_2µg/m³N en las estaciones Concón, Quintero y Los Maitenes 219
Tabla 9-11 Tabal contingencia modelo 219
Tabla 10-1 Emisiones 2018 224
Tabla 10-2 Carta Gantt y costos asociados 226

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Estaciones de calidad del aire y meteorología disponibles en la zona de estudio 4
Figura 2-2 Ejemplo de visualización datos disponibles para la estación Centro Quintero 10
Figura 2-3 Ejemplo de visualización datos disponibles para la estación Concón..... 11
Figura 2-4 Estación de monitoreo Junta de Vecinos y árboles cercanos que pueden afectar la representatividad de la medición de la velocidad de viento 14
Figura 2-5 Estación de monitoreo Valle Alegre y árboles cercanos que pueden afectar la representatividad de la medición de la velocidad de viento 14
Figura 2-6 Ubicación de estación Colmo, a un costado del Río Aconcagua..... 15
Figura 3-1 Imagen de sensor de temperatura y humedad del aire con protector de radiación con ventilación natural 20
Figura 3-2 Vista general de la Torre Meteorológica..... 23
Figura 3-3 Propuesta de instalación de estación meteorológica en Pichidangui 28
Figura 3-4 Alternativas de ubicación estación meteorológica en altura 29
Figura 3-5 Ejemplo de datalogger 30
Figura 3-6 Globo cautivo (Fuente: catálogo del fabricante) 33
Figura 3-7 Imagen de un Nefobasímetro 35
Figura 3-8 Imagen del equipo WINDCUBE® 36
Figura 3-9 Imagen del equipo LAP-300 con accesorio RASS 37
Figura 3-10 Ejemplo de cámara de vigilancia..... 40
Figura 3-11 Propuesta de ubicación para cámaras de Vigilancia en Quintero 41
Figura 4-1 Ubicación del Radiosonda de Santo Domingo y estaciones de monitoreo en la zona de estudio..... 46
Figura 4-2 Ubicación estaciones de monitoreo en la zona de estudio incluyendo la Torre meteorológica Principal 49
Figura 4-3 Vista general de la Torre Meteorológica Principal..... 49
Figura 4-4 Perfil de temperatura y humedad relativa media en Santo Domingo para cada configuración sinóptica. 53
Figura 4-5 Perfil de viento zonal y meridional medio en Santo Domingo para cada configuración sinóptica. 54
Figura 4-6 Altura de la base y diferencia de temperatura entre base y tope para las inversiones térmicas durante la mañana en Santo Domingo para cada configuración sinóptica. 55
Figura 4-7 Diferencia de temperatura y viento medio entre 10 y 40 metros en la torre meteorológica Principal para cada configuración sinóptica. 57
Figura 4-8 Número de días en Quintero con valores horarios de SO_2 ≥500 µg/m³N y días con inversión radiativa nocturna 59
Figura 4-9 Número de días en Quintero con valores horarios 500 µg/m³N >SO_2 ≥350 µg/m³N y días con inversión radiativa nocturna, y promedio de las horas con dT ≥7 59
Figura 4-10 Número de días con base de inversión térmica en superficie, 2016-2019..... 60
Figura 4-11 Número de casos de máximos horarios con dT>0 en 2019 60
Figura 4-12 Ciclo diario promedio mensual de la diferencia de Temperatura 40-10m año 2018 61

Figura 4-13 Promedios mensuales de la diferencia de temperatura dT>0 en la torre meteorológica (40-10 m) año 2019 62
Figura 4-14 Promedio valores máximos diarios mensuales con diferencia de temperatura dT>0 en la torre meteorológica (40-10 m) 62
Figura 4-15 Concentración diaria de SO_2 en las estaciones Los Maitenes, Concón y Quintero para cada configuración sinóptica 63
Figura 4-16 Perfil de temperatura y humedad relativa media en Santo Domingo para cada configuración sinóptica en periodo frío (izquierda) y periodo cálido (derecha). 64
Figura 4-17 Perfil de viento zonal y meridional medio en Santo Domingo para cada configuración sinóptica en periodo frío (izquierda) y periodo cálido (derecha). 65
Figura 4-18 Altura de la base para las inversiones térmicas durante la mañana (12Z) en Santo Domingo para cada configuración sinóptica en periodo frío (izquierda) y periodo cálido (derecha). 66
Figura 4-19 Diferencia de temperatura entre base y tope para las inversiones térmicas durante la mañana en Santo Domingo para cada configuración sinóptica en periodo frío (izquierda) y periodo cálido (derecha) 67
Figura 4-20 Diferencia de temperatura entre 10 y 40 metros en la torre meteorológica Principal para cada configuración sinóptica en periodo frío (izquierda) y periodo cálido (derecha) 68
Figura 4-21 Viento medio entre 10 y 40 metros en la torre meteorológica Principal para cada configuración sinóptica en periodo frío (izquierda) y periodo cálido (derecha). 68
Figura 4-22 Concentración diaria de SO_2 en las estaciones Los Maitenes, Concón y Quintero para cada configuración sinóptica en periodo frío (arriba) y periodo cálido (abajo) 70
Figura 5-1 Configuraciones de escala sinóptica y mesoescala 79
Figura 5-2 Frecuencia de ocurrencia configuraciones 2016-2019 79
Figura 5-3 Distribución mensual de configuraciones sinópticas y mesoescala 80
Figura 5-4 Presión en superficie hPa 81
Figura 5-5 Temperatura en superficie 82
Figura 5-6 Humedad relativa en superficie 83
Figura 5-7 Temperatura en 925 hPa 84
Figura 5-8 Humedad relativa en 925 hPa 85
Figura 5-9 Temperatura en 850 hPa 86
Figura 5-10 Humedad relativa en 850 hPa 87
Figura 5-11 Altura geopotencial en 500 hPa 88
Figura 5-12 Humedad relativa en 500 hPa 89
Figura 5-13 Espesor 1000-500 hPa 90
Figura 5-14 Configuraciones meteorológicas asociadas a concentraciones horarias $SO_2 \geq 500$ $\mu g/m^3N$ en Los Maitenes 92
Figura 5-15 Configuraciones meteorológicas asociadas a concentraciones horarias 500 $\mu g/m^3N > SO_2 \geq 350$ $\mu g/m^3N$ en Los Maitenes 92
Figura 5-16 Horas en que se superó las concentraciones horarias $SO_2 \geq 500$ $\mu g/m^3N$ en Los Maitenes 93
Figura 5-17 Horas en que se superó las concentraciones horarias $SO_2 \geq 350$ $\mu g/m^3N$ en Los Maitenes 94

Figura 5-18 Configuraciones meteorológicas asociadas a concentraciones horarias SO_2 ≥ 500 µg/m³N en Quintero..... 94
Figura 5-19 Configuraciones meteorológicas asociadas a concentraciones horarias 500 µg/m³N >SO_2 ≥ 350 µg/m³N en Quintero 95
Figura 5-20 Horas en que se superó las concentraciones horarias SO_2≥500 µg/m³N en Quintero. 95
Figura 5-21 Horas en que se superó las concentraciones horarias SO_2≥500 µg/m³N en Quintero.. 96
Figura 5-22 Configuraciones meteorológicas asociadas a concentraciones horarias SO_2 ≥ 500 µg/m³N en Concón 96
Figura 5-23 Configuraciones meteorológicas asociadas a concentraciones horarias 500 µg/m³N >SO_2 ≥ 350 µg/m³N en Concón 97
Figura 5-24 Horas en que se superó las concentraciones horarias SO_2≥350 µg/m³N en Concón 98
Figura 5-25 Horas en que se superó las concentraciones horarias SO_2≥500 µg/m³N en Concón ... 98
Figura 6-1 Número de días con valores horarios de SO_2 ≥500 µg/m³N, Los Maitenes, Quintero y Concón. 2016 a 2019..... 103
Figura 6-2 Número de días con valores horarios de SO_2 ≥350 y menores a 500 µg/m³N, correspondiente a la superación de la norma actual, Los Maitenes, Quintero y Concón. 2016 a 2019..... 104
Figura 6-3 Ciclos diarios promedios 2016-2019 estación Concón 105
Figura 6-4 Ciclos diarios promedios 2016-2019 estación Quintero..... 105
Figura 6-5 Ciclos diarios promedios año 2016-2019 estación Los Maitenes 106
Figura 6-6 Comportamiento SO_2 (µg/m³) v/s diferencia de temperatura 40-10m (°C), ciclo diario Concón 2016-2019 107
Figura 6-7 Comportamiento SO_2 v/s diferencia de temperatura 40-10m, ciclo estacional Concón 2016-2019 108
Figura 6-8 Comportamiento SO_2 v/s diferencia de temperatura 40-10m, ciclo diario Quintero 2016-2019..... 109
Figura 6-9 Comportamiento SO_2 v/s diferencia de temperatura 40-10m, ciclo estacional Quintero 2016-2019 110
Figura 6-10 Comportamiento SO_2 v/s diferencia de temperatura 40-10m, ciclo diario Los Maitenes 2016-2019 111
Figura 6-11 Correlación SO_2 v/s diferencia de temperatura 40-10m, ciclo estacional Los Maitenes 2016-2019 112
Figura 6-12 Mapa ubicación estaciones y principales fuentes de emisión en la zona de estudio.. 113
Figura 6-13 Mapas con rosas de viento para las estaciones de Concón, Quintero y Los Maitenes en presencia de Vaguadas Costeras, durante periodo frío y cálido del año 2018..... 115
Figura 6-14 Rosa anual de concentración de SO_2, estación Concón 2016 a 2019 116
Figura 6-15 Rosa anual de concentración de SO_2, estación Quintero 2016 a 2019..... 117
Figura 6-16 Rosa anual de concentración de SO_2, estación Los Maitenes 2016 a 2019 117
Figura 6-17 Rosas de concentración de SO_2 ciclo anual para estación Concón 2016-2019..... 118
Figura 6-18 Rosas de concentración de SO_2 ciclo anual para estación Quintero 2016-2019 119
Figura 6-19 Rosas de concentración de SO_2 ciclo anual para estación Los Maitenes 2016-2019 .. 120
Figura 6-20 Rosas de concentración de SO_2 ciclo diario para estación Concón 2016-2019 121
Figura 6-21 Rosas de concentración de SO_2 ciclo diario para estación Quintero 2016-2019..... 122
Figura 6-22 Rosas de concentración de SO_2 ciclo diario para estación Los Maitenes 2016-2019.. 123

Figura 6-23 Rosas anuales de concentración de MP2,5, estación Concón 2016 a 2019 124
Figura 6-24 Rosas de concentración de MP2,5, Ciclo anual promedio, estación Quintero 2016 a 2019..... 125
Figura 6-25 Rosas de concentración de MP2,5, Ciclo anual promedio, estación Los Maitenes 2016 a 2019..... 126
Figura 6-26 Rosas de concentración de MP2,5, Ciclo anual promedio, estación Concón 2016 a 2019 127
Figura 6-27 Rosas de concentración de MP2,5, Ciclo anual promedio, estación Quintero 2016 a 2019..... 128
Figura 6-28 Rosas de concentración de MP2,5, Ciclo anual promedio, estación Los Maitenes 2016 a 2019..... 129
Figura 6-29 Rosas de concentración de MP2,5, Ciclo diario promedio, estación Concón 2016 a 2019 130
Figura 6-30 Rosas de concentración de MP2,5, Ciclo diario promedio, estación Quintero 2016 a 2019..... 131
Figura 6-31 Rosas de concentración de MP2,5, Ciclo diario promedio, estación Los Maitenes 2016 a 2019..... 132
Figura 6-32 Ciclos diarios de SO_2 (µg/m^{3}N) y MP2,5 (µg/m^{3}N) v/s velocidad de viento (m/s) en Concón, meses promedio 2016-2019 135
Figura 6-33 Ciclos diarios de SO_2 y MP2,5 v/s velocidad de viento en Quintero, meses promedio 2016-2019 136
Figura 6-34 Ciclos diarios de SO_2 y MP2,5 v/s velocidad de viento en Los Maitenes, meses promedio 2016-2019..... 137
Figura 7-1 Tipos de pluma de acuerdo con el gradiente de temperatura vertical (GTV) 146
Figura 8-1 Plataforma de pronóstico de calidad del aire AirNow, la escala de colores utilizada se basa en los riesgos para la salud. 170
Figura 8-2 Arquitectura autoencoder 171
Figura 8-3 Arquitectura deep learning SAE 172
Figura 8-4 Pronóstico MP10 a 24 y 48 h, estación Saint André de Besós, zona costera, res. 1km, Nov 2020. 174
Figura 8-5 Pronóstico MP2,5 a 24 y 48 h para estación Toledo, res. 4km, Nov 2020..... 175
Figura 9-1 Dominio de modelación 181
Figura 9-2 Topografía SRTM3 182
Figura 9-3 Modelo de elevación digital DEM 183
Figura 9-4 Ciclo diario de magnitud del viento modelada y observada, estación Concón 2018 185
Figura 9-5 Ciclo estacional de magnitud del viento (m/s) en la estación Concón, 2018, panel superior datos modelados y panel inferior d atos observados..... 186
Figura 9-6 Ciclo diario de magnitud del viento modelada y observada, estación Quintero 2018.. 187
Figura 9-7Ciclo estacional de magnitud del viento (m/s) en la estación Quintero, 2018, panel superior datos modelados y panel inferior datos observados..... 188
Figura 9-8 Ciclo diario de magnitud del viento modelada y observada, estación Los Maitenes 2018 189
Figura 9-9 Ciclo estacional de magnitud del viento (m/s) en la estación Los Maitenes, 2018, panel superior datos modelados y panel inferior datos observados..... 190

Figura 9-10 Ciclo estacional de Temperatura °C, panel superior observada en la estación Concón y panel inferior modelada para Concón, Quintero y Los Maitenes. 191
Figura 9-11 Ciclo diario de dirección de viento Concón 2018, panel superior modelada y panel inferior observada. Histograma de frecuencias en base 1. 194
Figura 9-12 Ciclo diario de dirección de viento Quintero 2018, panel superior modelada y panel inferior observada. Histograma de frecuencias en base 1. 195
Figura 9-13 Ciclo diario de dirección de viento Los Maitenes 2018, panel superior modelada y panel inferior observada. Histograma de frecuencias en base 1. 196
Figura 9-14Ciclo estacional de Altura de capa de mezcla modelada 2018, panel superior Estación Quintero, panel inferior estación Los Maitenes. 198
Figura 9-15 Receptores discretos en azul y fuentes de emisión en rojo, coordenadas del modelo LCC. 203
Figura 9-16 Receptores de grilla. 204
Figura 9-17 Ciclo diario de concentración SO_2 modelada y observada, estación Concón 2018. 210
Figura 9-18 Ciclo estacional de concentración de SO_2 en la estación Concón, 2018, panel superior datos modelados y panel inferior datos observados. 211
Figura 9-19 Ciclo diario de concentración MP2.5 modelada y observada, estación Concón 2018 212
Figura 9-20 Ciclo diario de concentración SO_2 modelada y observada, estación Quintero 2018 .. 213
Figura 9-21 Ciclo estacional de concentración de SO_2 en la estación Concón, 2018, panel superior datos modelados y panel inferior datos observados. 214
Figura 9-22Ciclo diario de concentración MP2.5 modelada y observada, estación Quintero 2018215
Figura 9-23 Ciclo diario de concentración SO_2 modelada y observada, estación Los Maitenes 2018 216
Figura 9-24 Ciclo estacional de concentración de SO_2 en la estación Los Maitenes, 2018, panel superior datos modelados y panel inferior datos observados 217
Figura 9-25Ciclo diario de concentración MP2.5 modelada y observada, estación Quintero 2018218

1 Introducción

En el marco de las medidas del Plan de Gestión de Episodios Críticos para calidad del aire, establecidas en el capítulo VIII del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica vigente para las Comunas de Concón, Quintero, Puchuncaví (D.S.N°105/2018), a la fecha se cuenta con un pronóstico meteorológico orientado a calidad del aire, basado en la información entregada diariamente por la Dirección Meteorológica de Chile. Dicho pronóstico, junto a la revisión de las condiciones meteorológicas sinópticas y locales, permite prever las condiciones de mala ventilación que puedan traducirse en un aumento de concentraciones de los contaminantes observados en la zona de interés.

En forma complementaria, el Plan en su Artículo N°48, establece que, en un plazo de 24 meses contados desde su publicación, el Ministerio del Medio Ambiente deberá elaborar un modelo de calidad del aire para la zona saturada. Lo anterior se traduce en la necesidad de caracterizar el factor meteorológico y su efecto en el comportamiento de los contaminantes atmosféricos observados en la zona (gases y partículas). Esto, con el objetivo de categorizar las condiciones de ventilación observadas y pronosticarlas en términos de "Buenas, Regulares o Malas", siendo necesario por ejemplo, evaluar el efecto sobre la calidad del aire a partir de la ocurrencia de fenómenos meteorológicos de escala sinóptica y de mesoescala, tales como sistemas frontales (activos o debilitados), desarrollo de núcleos fríos, evolución de "vaguadas" o "Bajas Costeras", evolución de la capa de mezcla y variación de intensidad de las inversiones térmicas, entre otras configuraciones meteorológicas que se asocian a la ocurrencia de eventos de aumento de la concentración de contaminantes en la zona geográfica que comprende dichas comunas.

En este contexto, y con el objetivo de cumplir con lo establecido en dicho Plan se requiere el desarrollo de un estudio de caracterización del factor meteorológico para calidad del aire y categorización de las condiciones de ventilación para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví.
En respuesta al punto anterior y a la Licitación ID: 608897-7 LE20 de la Subsecretaría de Medio Ambiente del MMA, este documento constituye el Informe Final “Caracterización del Factor Meteorológico para Calidad del Aire y Categorización de las Condiciones de Ventilación para las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví”, desarrollado por AMBIMET® Área Servicios Ambientales, dando cumplimiento a los siguientes productos especificados en las Bases Técnicas (BT) de este estudio:

i. Análisis sobre la calidad de la información meteorológica (superficie y altura disponible) y de calidad del aire, y su potencial uso con fines de pronóstico de las condiciones de ventilación para calidad del aire.
ii. Sugerencias sobre la medición de nueva información meteorológica y sus costos de implementación y operación.

iii. Caracterización de la estructura vertical de la atmósfera con identificación de la estabilidad superficial y regional, y su efecto en el ciclo diario y/o estacional del transporte de contaminantes.

iv. Clasificación de los fenómenos meteorológicos a distintas escalas, su frecuencia de ocurrencia y su relación con el desarrollo de eventos de aumento de concentraciones de contaminantes atmosféricos.

v. Identificación de las variables meteorológicas y su relación con la ocurrencia de eventos de incrementos de las concentraciones de contaminantes.

vi. Categorización de las condiciones de ventilación en términos de "Bueno, Regulares y Malas".

vii. Evaluación de las metodologías de pronóstico de calidad del aire revisadas.

viii. Resultados del ejercicio de modelación de calidad del aire con fines de pronóstico.

ix. Resultados del análisis de la factibilidad técnica, costos de implementación y operación de las metodologías revisadas incluyendo los niveles de predictibilidad y porcentajes de acierto esperados.

x. Carpeta con presentaciones y resumen de las actividades desarrolladas durante el taller mediante registro fotográfico, ppt, entre otros.

El documento contempla además, un Volumen II de Anexos que entrega detalles sobre aspectos específicos y que complementan la información principal, y también otro Anexo en formato digital.

2 Producto i: Análisis sobre la calidad de la información meteorológica (superficie y altura disponible) y de calidad del aire, y su potencial uso con fines de pronóstico de las condiciones de ventilación para calidad del aire

2.1 Información a utilizar y metodología de análisis

2.1.1 Datos de meteorología y calidad de aire en estaciones de superficie

En las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví (CQP) se está realizando monitoreo de contaminantes atmosféricos y meteorología, en redes privadas y una estación pública, aunque el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférico (D.S. N°105/2018 del MMA) considera el traspaso de las estaciones privadas a la red pública. En Concón asociado a la Refinería de ENAP (ERA) se realiza monitoreo en las estaciones Concón, Colmo, Junta de Vecinos y Las Gaviotas, adicionalmente a fines del año 2017 el MMA instaló una estación para medición de MP2,5. En Quintero y Puchuncaví se realiza monitoreo en las estaciones Torre Meteorológica Principal, La Greda, Los Maitenes, Puchuncaví, Ventanas, Quintero, Sur y Valle Alegre asociadas a la Fundición de Codelco División Ventanas y a la Central Termoeléctrica de AES-Gener del Complejo Industrial Ventanas, en la estación Centro Quintero del Terminal GNL y en las estaciones Loncura y Central Quintero asociadas a Central Termoeléctrica de ENEL. La ubicación de las estaciones se ilustra en la Figura 2-1.

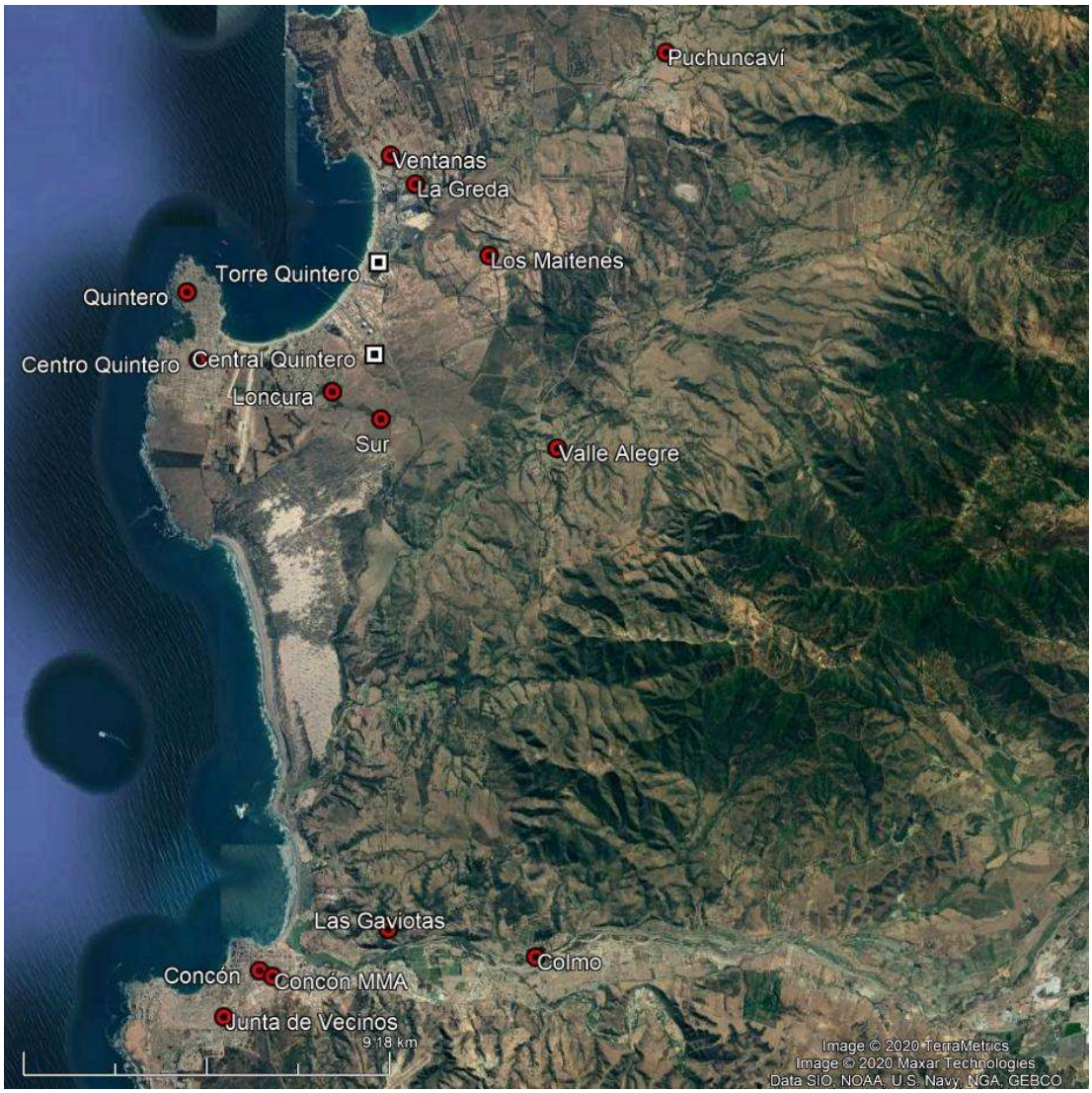
Los datos históricos registrados en las estaciones de CQP están disponibles en gran medida para consulta pública online en las páginas web del MMA y de SINCA (Sistema de Información Nacional de Calidad de Aire) en https://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/index/id/V. La información en SINCA corresponde a datos con validación preliminar u operacional que puede contener errores asociados a fallas o periodos de mantención y calibración, por lo cual no se puede usar en forma directa. Por otro lado, la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) producto de las fiscalizaciones a las estaciones de monitoreo de ERA y Codelco Ventanas-AES Gener, consideradas en la elaboración del PPDA para CQP, ha publicado Informes de evaluación del cumplimiento de las Normas de calidad de aire que incluyen datos validados de SO_2, MP10 y MP2,5 desde el año 2013 disponibles en el sitio https://snifa.sma.gob.cl/Fiscalizacion/.

Para el presente estudio se considera una revisión de la información disponible entre los años 2010 y 2019 de los contaminantes MP10, MP2,5 y SO_2, más las variables meteorológicas que se miden en las estaciones de calidad de aire (velocidad y dirección de viento, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, radiación solar).

Para facilitar la recopilación de datos, la contraparte técnica del MMA se encargó de solicitar los datos horarios del período 2010-2019 a las empresas propietarias de las estaciones de monitoreo en CQP, mencionadas en los párrafos anteriores, dejándolos disponibles para revisión y posterior análisis.

La Tabla 2-1 y la Tabla 2-2 resumen los datos entregados por el MMA. Para cada estación se incluyen las coordenadas UTM. La ubicación de las estaciones se muestra en la Figura 2-1.

Figura 2-1 Estaciones de calidad del aire y meteorología disponibles en la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia en Google Earth

Tabla 2-1 Datos horarios de MP2,5; MP10 y SO_2 disponibles para el estudio, período 2010-2019

Estación		Coordenadas (m)		Variables medidas[1]		
		UTM E	UTM N	MP2,5	MP10	SO_2
Concón	Concón MMA	265069	6354089	20-12-2017	ND	ND
	Colmo	271646	6354733	ND	ND	01-01-2010
	Concón	264737	6354228	ND	26-02-2016	01-01-2010
	Junta de Vecinos	263944	6353098	ND	ND	01-01-2010
	Las Gaviotas	267940	6355336	ND	ND	01-01-2010

Estación		Coordenadas (m)		Variables medidas[1]		
		UTM E	UTM N	MP2,5	MP10	SO_2
Puchuncaví	Puchuncaví	274379	6377331	01-02-2016	01-02-2016	01-01-2010
	La Greda	268185	6373910	01-12-2011	01-01-2010	01-01-2010
	Los Maitenes	270073	6372171	01-12-2011	01-01-2010	01-01-2010
	Ventanas	267539	6374605	01-01-2013	01-01-2013	01-01-2013
Quintero	Centro Quintero	262853	6369407	09-07-2019	09-07-2019	22-06-2012
	Loncura	266238	6368658	01-09-2015	20-10-2011	03-10-2011
	Sur	267461	6368037	ND	28-01-2010	01-01-2010
	Valle Alegre	271889	6367413	ND	30-10-2014	01-01-2010
	Quintero	262528	6371087	01-02-2016	01-02-2016	01-01-2010

[1] En la tabla se indica la fecha de inicio de datos disponibles, se considera hasta el año 2019
ND indica que no hay medición durante el período 2010-2019

Tabla 2-2 Datos horarios de variables meteorológicas disponibles para el estudio, período 2010-2019

Estación		Coordenadas (m)		Variables medidas[1]					
		UTM E	UTM N	VV	DV	T	HR	RS	PA
Concón	Colmo	271646	6354733	01-01-2010	01-01-2010	25-10-2016	25-10-2016	25-10-2016	10-04-2019
	Concón	264737	6354228	01-01-2010	01-01-2010	01-01-2010	01-01-2010	01-01-2010	14-09-2018
	Junta de Vecinos	263944	6353098	01-01-2010	01-01-2010	25-10-2016	25-10-2016	25-10-2016	10-04-2019
	Las Gaviotas	267940	6355336	01-01-2010	01-01-2010	25-10-2016	25-10-2016	25-10-2016	10-04-2019
Puchuncaví	Puchuncaví	274379	6377331	01-01-2010	01-01-2010	ND	ND	ND	ND
	La Greda	268185	6373910	01-01-2010	01-01-2010	ND	ND	ND	ND
	Los Maitenes	270073	6372171	01-01-2010	01-01-2010	ND	ND	ND	ND
	Ventanas	267539	6374605	12-03-2013	01-01-2013	ND	ND	ND	ND
	Torre Meteo.[2]	267310	6371939	24-11-2011	24-11-2011	24-11-2011	24-11-2011	24-11-2011	24-11-2011
Quintero	Centro Quintero	262853	6369407	22-06-2012	02-08-2016	ND	ND	ND	ND
	Loncura	266238	6368658	01-10-2011	01-10-2011	01-10-2011	01-10-2011	01-10-2011	01-10-2011
	Sur	267461	6368037	01-01-2010	30-07-2012	ND	ND	ND	ND
	Valle Alegre	271889	6367413	01-01-2010	30-07-2012	ND	ND	ND	ND
	Central Quintero	267262	6369644	01-01-2010	01-01-2010	01-01-2010	01-01-2010	01-01-2010	01-01-2010
	Quintero	262528	6371087	18-10-2011	30-07-2012	ND	ND	ND	ND

Donde: VV= Velocidad de Viento, DV= Dirección de Viento, T= Temperatura, HR= Humedad Relativa, RS= Radiación Solar y PA= Presión Atmosférica

[1]En la tabla se indica la fecha de inicio de datos disponibles, se considera hasta el año 2019

[2] En Torre meteorológica principal la medición de VV, DV, T y HR se realiza a 3 niveles: 10m, 20 m y 40 m y la medición de RS y PA se realiza a 20m.

ND indica que no hay medición durante el período 2010-2019

La metodología de análisis de la información de calidad de aire y meteorología de superficie entregada por el MMA consideró los siguientes puntos:

a) Confección de bases de datos para revisión mediante planillas Excel por cada estación de monitoreo y visualización usando OpenAir.

Mediante el uso de planillas Excel se elaboraron archivos para cada estación de monitoreo ordenando los datos en formato de serie de tiempo de valores horarios. En cada archivo la primera columna corresponde a la fecha (en formato ddmmaaaahh:mm) y las columnas siguientes contienen las variables que son medidas en la estación. Posteriormente cada archivo de dato es importado en la aplicación **Studio R**[1] con la librería **OpenAir**[2] específica para visualización gráfica de datos de calidad de aire y meteorología. Además, mediante el uso de la función Summary Plot de OpenAir permite la visualización para determinar períodos sin mediciones y datos o períodos con datos evidentemente erróneos.

b) Análisis y evaluación de coherencia interna y física de los datos.

En esta etapa utilizando filtros en Excel se verificó para cada variable el cumplimiento de valores en rangos de medición y que estos valores se encuentren en los rangos esperados de acuerdo a estudios anteriores (UNTEC 2012[3], CENMA 2013[4], GEOAIRE 2015[5], CMM 2017[6]) y de acuerdo a la experiencia del equipo consultor en la zona. En caso de encontrar valores fuera de los rangos esperados para una variable, se revisan los valores de la misma variable en las estaciones cercanas para confirmar o recomendar no considerar el valor registrado.

Tabla 2-3 Rangos de medición y rangos esperados para variables meteorológicas

Variable	Rango de medición	Rango esperado para la zona (promedios horarios)
Temperatura	-30 a 50 °C	-2 a 32°C
Humedad relativa	0 – 100 %	20 – 100 %
Velocidad de viento	0 – 60 m/s	0 –10 m/s
Dirección de viento	0 – 360 °deg	0 – 360 °deg
Presión Atmosférica	600 – 1100 hPa	990 a 1025hPa
Radiación Solar	0 – 2000 W/m²	0 – 1150 W/m²

Fuente: Elaboración propia

[1] https://rstudio.com/
[2] https://bookdown.org/david_carslaw/openair/
[3] UNTEC 2012. "Diagnóstico Plan de Gestión Atmosférica - Región de Valparaíso Implementación de un Modelo Atmosférico". Informe Final. Junio de 2012.
[4] CENMA, 2013. "Evaluación de exposición ambiental a sustancias potencialmente contaminantes presentes en el aire, comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví". Informe Final Corregido versión 4. Septiembre de 2013.
[5] GEOAIRE, 2015. "Evaluación de Medidas Costo Efectivas para Revisar y Reformular el Plan de Descontaminación Ventanas: Anexo1. Análisis de las variables meteorológicas". Noviembre de 2015
[6] CMM, 2017. "Evaluación y rediseño de redes de Monitoreo de Calidad del Aire". Informe Final Corregido. Agosto de 2017.

Los criterios de consistencia física incluyen:

- La radiación solar debe ser cercana a 0 w/m² durante el período nocturnos (aprox. de 20:00 a 06:00). Durante el período de 09:00 a 16:00 la radiación solar no puede ser cercana a 0 w/m². Revisar y eliminar estos valores.
- Revisar cuando valores se mantienen constantes por algunas horas.
- Las concentraciones de MP2,5 no deben ser mayores a MP10, pero considerando que la medición se realiza con distintos equipos es posible estas situaciones por desfase horario o cuando las concentraciones son muy bajas. Si la concentración de 24h de MP2,5 es mayor a MP10 se debe revisar estaciones cercanas.
- Descartar valores = 0 luego de períodos sin datos (probables cortes de energía eléctrica), especialmente en variables de calidad de aire por inicialización de los analizadores, lo cual puede demorar un par de horas.

c) Confección de base de datos con 1ra revisión

Mediante planillas Excel se realizaron las correcciones a los archivos por cada estación de acuerdo con los hallazgos de la revisión inicial. Se mantuvo la estructura del archivo, pero se eliminaron los datos para períodos con datos anómalos o que no cumplían con rangos de medición o los criterios físicos mencionados anteriormente.

En el caso de la dirección de viento y según escala de Beaufort y guía de instrumentos OMM[7], se asignó calma cuando la magnitud de la velocidad del viento es menor a 1 Km/h (0.278 m/s).

d) Visualización de series de tiempo para detectar datos anómalos

Luego de revisión inicial, los archivos de cada una de las estaciones fueron sometidos a un proceso más selectivo y sistemático utilizando el Software WindoGrapher[8], analizando las series de tiempo por períodos semanales ya sea para una estación o para varias estaciones simultáneas, con el objetivo de detectar desviaciones o valores anómalos.

En esta etapa, además, se realizó una comparación entre los valores de concentraciones de SO_2 entregados por la contraparte de MMA y los valores de SO_2 auditados por la SMA disponibles en SNIFA que corresponden a las 10 estaciones consideradas en el PPDA de CQP: Concón, Colmo, Junta de Vecinos, Las Gaviotas, La Greda, Los Maitenes, Puchuncaví, Quintero, Sur y Valle Alegre. El período con datos disponibles en SNIFA es desde 2013 a 2019.

El producto de esta etapa fue una nueva base de datos con una 2da revisión, pero manteniendo la estructura de la base de datos inicial.

e) Análisis y evaluación de la consistencia espacial y temporal de los datos

[7]Según escala Beaufort y Guía de instrumentos OMM, 2008
[8] Disponible en www.windographer.com

Para evaluar la consistencia espacial de los datos se realizaron comparaciones en WindoGrapher de cada variable con los valores registrados en las estaciones cercanas para el mismo período de tiempo. En esta etapa, además se incluye una comparación de ciclos diarios y de rosas de viento elaboradas mediante OpenAir y WindoGrapher. En el caso de elaboración de ciclos diarios mensuales, usando la función **timeVariation** en OpenAir se generaron en forma automática gráficos complementarios que corresponden a ciclos diarios para días de la semana, promedios mensuales y promedios semanales. Estos gráficos generados con **timeVariation** tienen mayor utilidad para análisis de variables de calidad de aire donde puede haber diferencias en las concentraciones debido al ciclo semanal de emisiones.

Para evaluar la consistencia temporal, cada variable de una estación se comparó con los valores registrados en años anteriores (comparación interanual). Se realizaron comparaciones a nivel de ciclos diarios, ciclos estacionales y promedios anuales usando OpenAir y WindoGrapher para extraer ciclos y promedios, los cuales posteriormente fueron comparados utilizando gráficos en Excel.

Para la comparación interanual de dirección del viento se construyeron rosas de viento para un año determinado en WindoGrapher y posteriormente se compararon distintos años usando Excel.

Además, en esta etapa para identificar posibles interferencias u obstáculos que hubieran podido alterar la representatividad de las mediciones, se revisaron imágenes satelitales (Google Earth) de la zona de emplazamiento de las estaciones, fotografías de las estaciones y su entorno cercano incluidas en el informe de CMM 2017[9].

f) Confección de bases de datos revisadas periodo 2010-2019

Mediante planillas Excel se realizaron ajustes en función de los hallazgos de la revisión de consistencia espacial y temporal, y se construyó una base de datos revisada disponible para las etapas siguientes del estudio.

[9] CMM, 2017. "Evaluación y rediseño de redes de Monitoreo de Calidad del Aire". Informe Final Corregido. Agosto de 2017.

2.1.2 Datos meteorológicos de altura escala regional

Se recibió de la contraparte técnica los radiosondeos para el período 2010-2019 de la estación Santo Domingo.

El radiosonda de Santo Domingo ubicado a 33,65° S y 71,61° W a 75 m. s.n.m. entrega información en la vertical de distintos parámetros una o dos veces al día (00 y 12 UTC[10]).

Para cada nivel de Presión (hPa) las variables son:

Altitud (mgp), temperatura (°C), temperatura del punto de rocío (°C), humedad relativa (%), razón de mezcla (g/kg), dirección (grados) y magnitud del viento (nudos), temperatura potencial (°K), temperatura potencial equivalente (°K) y temperatura potencial virtual (°K).

Además, entrega información de diversos índices, entre otros: Índices de estabilidad, energía convectiva potencial disponible (J/kg), nivel de convección libre (hPa), espesor 1000-500 hPa (mgp) y agua precipitable (mm).

La información entregada por el radiosonda se despliega en diagramas termodinámicos donde a través del análisis se puede determinar, entre otros: capas con estabilidad neutra, estable o inestable; base y tope de inversiones térmicas, nivel de la tropopausa.

El periodo considerado para el análisis debe ser el mismo para todas las variables disponibles, incluyendo los radiosondeos. Por tal motivo, y considerando que la estación de calidad del aire y meteorología de Quintero, en su ubicación actual, cuenta con datos desde fines del 2015, y que además registra la mayor cantidad de episodios por SO_2 en la zona de estudio, es que se seleccionan los años 2016 al 2019. La siguiente tabla muestra el porcentaje de datos disponibles del radiosondeo de Santo Domingo.

Tabla 2-4 Porcentaje de sondeos disponibles en el periodo 2016-2019

Año	%
2016	97,0
2017	92,9
2018	78,4
2019	90,4

Fuente: Elaboración propia con datos Radiosonda de Santo Domingo

[10] UTC: United Time Coordinated. En Chile en verano H.L.= UTC-3 en tanto en invierno UTC-4

2.2 Evaluar la calidad de la información meteorológica (de superficie y de altura) y de la calidad del aire disponible en la zona con fines de pronóstico de ventilación

2.2.1 Resultados de visualización inicial de datos de estaciones de superficie

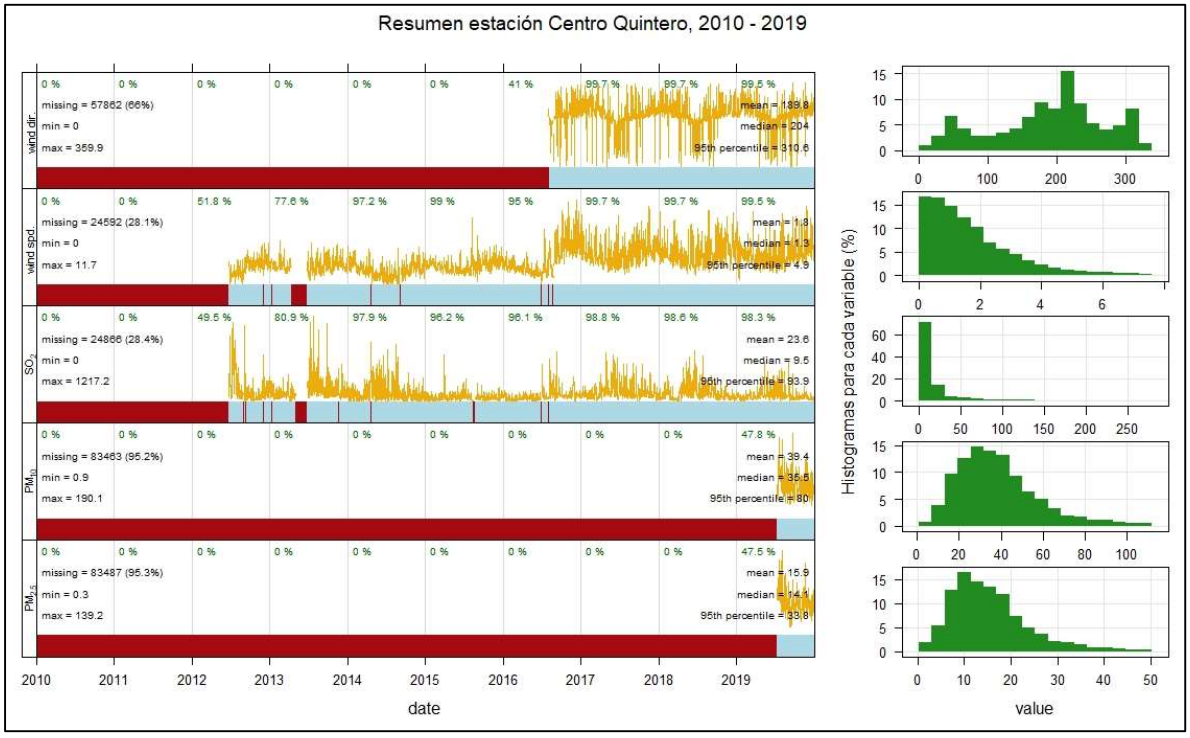
2.2.1.1 Visualización inicial de planillas de datos en OpenAir

La visualización utilizando OpenAir con la función summaryPlot y resolución de promedios diarios u horarios, fue una herramienta que permitió ver en una sola imagen los datos disponibles por cada estación de calidad de aire (SO_2, MP10 y MP2,5) y meteorológicas (VV, DV, T, HR, RS y PA) para el período Enero de 2010 a Diciembre 2019.

Esta visualización permitió detectar dos situaciones anómalas muy marcadas, la primera corresponde a la estación Centro Quintero (ver Figura 2-2) con un brusco aumento de los valores de la magnitud del viento (wind spd) desde mediados del año 2016 y la segunda corresponde a un descenso de los valores de radiación solar (RS) en la estación Concón (ver Figura 2-3) desde mediados de 2018.

En Anexos "Series de tiempo para visualizar datos recibidos para revisión y análisis, período 2010 a 2019", se incluyen las figuras para cada una de las estaciones con datos recibidos de la contraparte técnica de MMA para revisión y análisis.

Figura 2-2 Ejemplo de visualización datos disponibles para la estación Centro Quintero

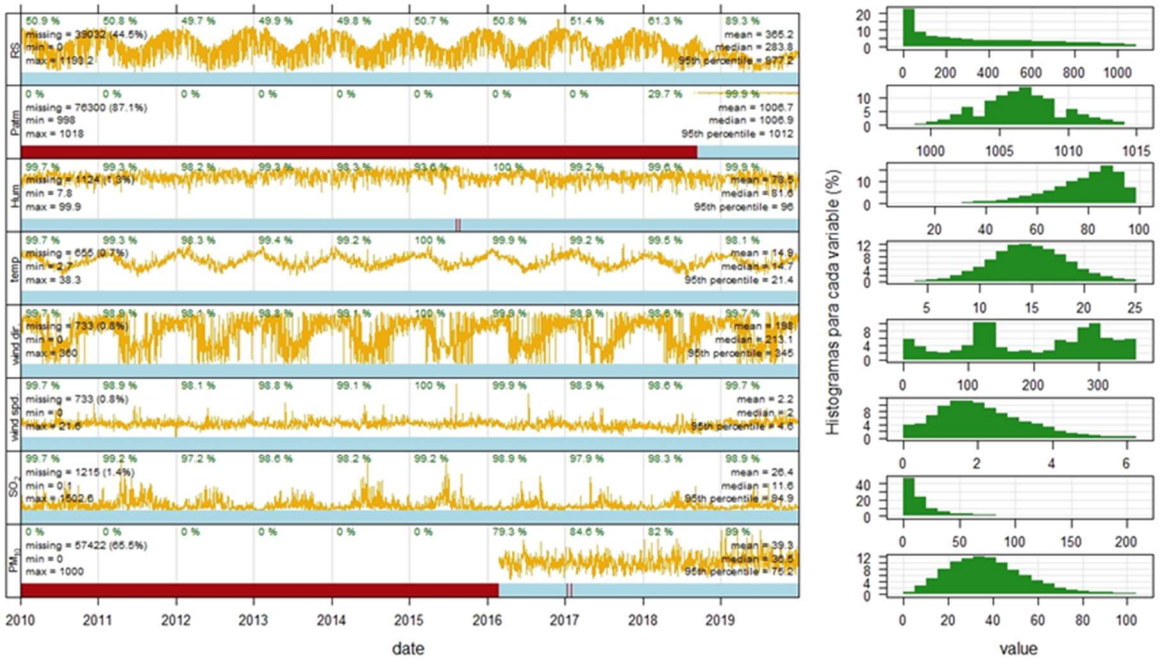


Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y Studio R+OpenAir

De acuerdo con lo presentado en la Figura 2-2 y en la Tabla 2-2, en la estación Centro Quintero los datos disponibles de dirección de viento comienzan el 2 de agosto de 2016, fecha que coincide con aumento de la magnitud del viento, la cual desde esa fecha tiene valores similares a los registrados en las estaciones Quintero y Loncura. Por ese motivo, se decidió no incluir en la base de datos revisada, los datos de Velocidad de viento de Centro Quintero durante el período 22 de Junio de 2012 al 01 de Agosto de 2016.

En la estación Concón, de acuerdo con el ejemplo de la Figura 2-3, desde mediados de 2018 los valores de radiación solar, especialmente los valores máximos en las tardes disminuyen hasta valores en torno al 70% respecto de los valores registrados en años anteriores y en comparación a las estaciones cercanas. Es muy probable que esta disminución esté asociada a problemas de mantención o falta de calibración del sensor de radiación solar.

Figura 2-3 Ejemplo de visualización datos disponibles para la estación Concón



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y Studio R+OpenAir

2.2.1.2 Visualización de series de tiempo

La visualización de series de tiempo con WindoGrapher permitió confirmar que más del 95% de la información revisada tiene un comportamiento esperado, con algunas situaciones menores o casos puntuales de datos anómalos que fueron identificados y eliminados de la nueva base de datos revisada. A modo de ejemplo se comentan los principales casos de datos anómalos detectados durante la visualización, para los cuales se incluyen Figuras de apoyo en el Anexo "Ejemplo Visualización de datos":

- Presión atmosférica mayor a 1025 hPa los días 27 y 28 de Septiembre de 2018 en la estación Torre meteorológica principal.
- En la torre meteorológica principal, entre Junio y Julio de 2012 hay periodos con datos de magnitud del viento a 40m cercanos a 0 m/s, pero las mediciones a 10m y 20m registraban valores superiores a 1m/s. Una situación similar ocurre para la magnitud del viento a 20m en Agosto de 2012 y Octubre de 2017.
- Humedad relativa con máximos cercanos a 120% entre Octubre de 2016 y enero de 2017 en la estación Colmo.
- Desviación de la temperatura en la estación Concón en los días 30 de Septiembre al 02 de Octubre de 2017 con valores mayores a 25°C, en cambio en estaciones cercanas las temperaturas fueron inferiores a 19°C.
- Entre 2010 y 2015, especialmente en las estaciones Colmo, Concón, Las Gaviotas y Junta de Vecinos de la Comuna de Concón, y en las estaciones Centro Quintero y Loncura de la Comuna de Quintero, se registraron concentraciones altas de SO_2 que podrían estar asociadas al programa de calibraciones semanales de cero/span. Esto se determinó al observar bruscos aumentos de concentraciones en una estación, mientras en las estaciones cercanas se mantenían valores bajos sin registrar aumentos en el mismo horario. En muchos casos estos aumentos de concentraciones se registran a horas del día cuando la dirección del viento no es desde las fuentes emisoras principales de SO_2. Además, la frecuencia de ocurrencia de valores altos es cada 6 o 7 días de separación entre los eventos, lo cual se ajustaría a un programa de calibraciones de cero/span. Por otro lado, al comparar estos valores con los auditados de la SMA disponibles desde el año 2013, se constató que la mayoría de los eventos correspondían a valores invalidados en los archivos de la SMA. Por este motivo, se decidió considerar los datos auditados de SO_2 en las 10 estaciones consideradas en la evaluación de la SMA (Concón, Colmo, Junta de Vecinos, Las Gaviotas, La Greda, Los Maitenes, Puchuncaví, Quintero, Sur y Valle Alegre), desde 01 de enero de 2013 en adelante.

2.2.2 Resultados de análisis de consistencia espacial y temporal de datos de estaciones de superficie

El análisis de consistencia espacial realizado mediante comparación de series de tiempo, ciclos diarios y el análisis de consistencia temporal mediante comparaciones de ciclos anuales e interanuales, permite concluir que la información revisada en su conjunto es consistente con patrones bien definidos del comportamiento de las variables que se repiten en los distintos años. Se identificaron algunas diferencias o situaciones específicas para períodos acotados de tiempo en la magnitud del viento, temperatura y radiación solar principalmente, pero que no comprometen el uso de la información para los objetivos del estudio.

Respecto a las diferencias en la magnitud del viento en la Comuna de Concón, al revisar los ciclos diarios del año 2019, se observan valores significativamente menores en la estación Junta de

Vecinos respecto a la estación Colmo, situación que se mantiene para todos los meses del año. En cambio, en la comparación del año 2019 para las comunas de Quintero y Puchuncaví, es la estación Valle Alegre la que registra los valores más bajos y la estación Torre Meteorológica Principal los más altos. La comparación con los años anteriores (comparación interanual) confirmó el comportamiento observado el año 2019. Es decir, que los valores de velocidad de viento observados son consistentes en el tiempo y no corresponden a fallas instrumentales o problemas asociados al procesamiento de datos. En el caso de las estaciones Junta de Vecinos y Valle Alegre podría haber una influencia de la ubicación de las estaciones situación que se comenta en el punto siguiente.

Respecto a la temperatura, la comparación con estaciones cercanas en la comuna de Concón muestra un notorio aumento de las máximas en la estación Las Gaviotas en los meses de Octubre a Noviembre de 2019, verificándose con la comparación interanual que ese aumento solamente ocurrió ese año.

Con relación a la radiación solar, la comparación interanual de estaciones y para el mismo año con estaciones cercanas, muestra una disminución de las máximas diarias desde abril de 2018 en las estaciones Concón y Junta de Vecinos, siendo más marcada la disminución en la estación Concón especialmente en los meses de altas temperaturas. Por este motivo, se recomienda para los años 2018 y 2019 considerar la radiación de la estación Las Gaviotas como representativa de la zona.

En Anexo “Ejemplo de casos de análisis de consistencia espacial y temporal” se incluyen figuras que ilustran los casos mencionados anteriormente.

2.2.3 Representatividad de estaciones de superficie

En el análisis de consistencia espacial y temporal se identificó menores valores de magnitud del viento en Junta de Vecinos y Valle Alegre. Al revisar fotografías de las estaciones y del entorno se puede asumir que debe haber un efecto de la ubicación de las estaciones, las cuales fueron instaladas para monitoreo de calidad de aire y no necesariamente se consideró los obstáculos de árboles cercanos que pueden afectar las mediciones de la velocidad de viento.

Las figuras siguientes ilustran los árboles cercanos a las estaciones de monitoreo, que actúan como obstáculos para la velocidad del viento en Junta de Vecinos y Valle Alegre. En esta última estación, puede sumarse el efecto de encontrase más al interior del valle, alejada de la costa por lo que podría haber una disminución de la magnitud del viento en comparación a los valores registrados en el sector costero.

Figura 2-4 Estación de monitoreo Junta de Vecinos y árboles cercanos que pueden afectar la representatividad de la medición de la velocidad de viento

Fuente: Elaboración propia con Google Earth

Figura 2-5 Estación de monitoreo Valle Alegre y árboles cercanos que pueden afectar la representatividad de la medición de la velocidad de viento

Fuente: Elaboración propia con Google Earth

Otra situación donde la representatividad de las mediciones podría estar afectada por la ubicación corresponde a la estación Colmo con valores más altos de magnitud del viento a pesar de estar ubicada hacia el interior del valle. La explicación más probable es que sea resultado del corredor de viento y efecto enfriador sobre la temperatura, generado por la cercanía del río Aconcagua, cuyo borde pasa a aproximadamente 90 m de la estación (en línea recta según medición en

Google Earth y Figura 2-6). Las magnitudes del viento son más altas que en el resto de las estaciones de la red Concón, desde Octubre a Abril, de acuerdo a ciclo anual. Las temperaturas en tanto presentan valores menores que el resto de las estaciones de esta red, notorios tanto en el ciclo diario como anual, aunque con mayor oscilación diurna que el resto[11].

Figura 2-6 Ubicación de estación Colmo, a un costado del Río Aconcagua

Fuente: Elaboración propia con Google Earth

A pesar de la reducción de la magnitud del viento en Valle Alegre y Concón, y de los valores más altos por efecto del Río Aconcagua en la estación Colmo, no hay una alteración de la forma de los ciclos diarios y ciclos anuales lo cual permite utilizar la información de estas estaciones con fines de pronóstico, y se puede considerar como representativa para los fines de este estudio.

Respecto a las mediciones de calidad de aire, la revisión ha permitido confirmar para SO_2 los resultados esperados, ya reportados en estudios anteriores y en los antecedentes del PPDA de CQP. Es decir, las estaciones con mayores concentraciones en cada comuna son Concón, Quintero y Los Maitenes. Las horas de mayores concentraciones de SO_2 coinciden con las horas en las cuales la dirección predominante del viento proviene desde la refinería en Concón (durante la noche y hasta las primeras horas de la mañana) y desde el complejo Industrial Ventanas hacia Quintero (durante la noche y hasta las primeras horas de la mañana) y hacia Los Maitenes (hacia el mediodía y horas de la tarde).

[11] Existen estudios en el país asociados a efectos reguladores del clima aplicado a zonas riparianas. Por ejemplo "Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile" Alexis E. Vásquez Departamento de Geografía, Universidad de Chile, 2016

2.2.4 Confección de Base de Datos Revisada

La mayoría de las estaciones que monitorea calidad de aire y meteorología tiene mediciones de SO_2, VV y DV para el período 2010-2019, excepto Ventanas (desde enero 2013), Loncura (desde Octubre 2011) y Centro Quintero (desde Junio 2012) estas 2 últimas incorporaron además mediciones de T, HR, RS y PA desde el inicio.

Para MP10 hay mediciones continuas desde 2010 solo en las estaciones La Greda, Los Maitenes y Sur, incorporando Loncura en octubre de 1011, Ventanas en enero de 2013, Valle Alegre en octubre de 2014 y desde febrero de 2016 Puchuncaví y Quintero. En la Comuna de Concón solamente hay mediciones en la estación Concón desde febrero de 2016.

Respecto a MP2,5 hay mediciones continuas desde diciembre de 2011 en las estaciones La Greda y Puchuncaví, incorporando Ventanas en enero de 2013, Loncura en septiembre de 2016, Puchuncaví en febrero de 2016, Concón en diciembre de 2017 y Centro Quintero en julio de 2019.

Para las variables meteorológicas T, HR, RS y PA el período con mayor cobertura corresponde a noviembre de 2016 a diciembre de 2019, con 7 estaciones midiendo en forma simultánea: Concón, Colmo, Junta de Vecinos, Las Gaviotas, Loncura, Central Quintero y torre meteorológica principal.

El resultado de las actividades de revisión, sumado a la comparación espacial y temporal de los datos permitió generar una base de datos revisada para el período 2010-2019 y los porcentajes de datos revisados disponibles son presentados en la Tabla 2-5. Excepto casos puntuales explicados anteriormente, hay un alto porcentaje de datos disponibles aceptados respecto a los datos inicialmente entregados. Los porcentajes más bajos corresponden en una gran mayoría a variables de estaciones que iniciaron sus mediciones en años más recientes, situación comentada al inicio de este punto e informada en la Tabla 2-1 y en la Tabla 2-2.

Tabla 2-5 Porcentajes de datos horarios revisados de variables meteorológicas disponibles para el estudio, período 2010-2019

Comuna/estación		MP2,5	MP10	SO_2	VV	DV	T	HR	RS	PA
Concón	Colmo	SM	SM	97,9	96,1	96,1	28,4	26,5	7,3	28,3
	Concón	SM	38,1	98,6	99,1	99,1	99,2	98,7	12,9	99,2
	Junta de Vecinos	SM	SM	97,6	98,9	98,9	31,7	31,5	7,3	31,5
	Las Gaviotas	SM	SM	97,4	98,6	98,6	31,5	31,4	7,2	31,5
Puchuncaví	Puchuncaví	38,8	38,8	99,1	99,3	99,3	SM	SM	SM	SM
	La Greda	79,3	99,2	98,9	98,8	98,8	SM	SM	SM	SM
	Los Maitenes	79,4	99,2	98,8	98,9	98,9	SM	SM	SM	SM
	Ventanas	97,8	96,9	98,0	96,1	98,7	SM	SM	SM	SM
	Torre Meteorologica[1]	SM	SM	SM	99,0	99,6	99,4	98,8	99,6	97,9
Quintero	Centro Quintero	6,4	6,3	95,0	44,9	45,2	SM	SM	SM	SM
	Loncura[2]	51,9	96,8	97,3	99,9	98,9	99,8	99,8	99,9	99,7
	Sur	SM	95,4	98,2	97,3	73,5	SM	SM	SM	SM

Comuna/estación		MP2,5	MP10	SO_2	VV	DV	T	HR	RS	PA
	Valle Alegre	SM	50,7	98,2	97,5	73,6	SM	SM	SM	SM
	Central Quintero[3]	SM	SM	SM	99,8	99,0	99,4	99,8	29,0	99,8
	Quintero	38,2	38,8	98,8	81,6	73,8	SM	SM	SM	SM

[1] En Torre Meteorológica datos disponibles desde el 1 de enero de 2012. Para VV, DV, T y HR se considera el promedio de los porcentajes de los niveles 10m, 20m y 40m.
[2] En Loncura datos disponibles desde 3 de octubre de 2011
[3] En Centro Quintero datos disponibles desde 22 de junio de 2012

2.3 Potencial uso de la Información con fines de pronóstico de las condiciones de ventilación para Calidad del Aire

Los análisis y gráficos efectuados en el Producto i de este informe muestran que la información es consistente en cuanto a su representatividad de la zona de estudio, Concón, Quintero y Puchuncaví, y para uso futuro con fines de pronóstico.

Sin embargo, para un análisis más exhaustivo y concluyente del comportamiento de la capa de mezcla superficial, del Factor de Ventilación y un mayor acierto en el pronóstico de las condiciones de ventilación asociadas a calidad de aire, se requiere contar con nuevos equipos y sensores que se detallan en el Producto ii.

Especial importancia tiene contar con información de altura, para determinar en línea, el perfil térmico vertical sobre la zona de pronóstico, la altura de la capa de mezcla superficial y el viento medio dentro de la capa. Un equipo que mida las variables antes mencionadas podría complementar la información que entrega actualmente un nefobasímetro instalado en Puchuncaví (en el recinto donde está emplazada la estación de monitoreo Puchuncaví).

Para efecto de este estudio se usará la información disponible de altura, consistente en el Radiosondeo de Santo Domingo representativo de las condiciones meteorológicas a escala regional y la información entregada por la Torre Meteorológica ubicada en la comuna de Puchuncaví, representativa de las condiciones de escala local.

El radiosondeo de Santo Domingo proporciona información del perfil vertical que se registra a la hora de su lanzamiento (1 o dos veces al día, a las 00 y 12 UTC), pero no necesariamente representará las condiciones que se observarán en las 06, 12 o 24 horas siguientes, en que se requiere analizar el paso y evolución de las configuraciones de escala sinóptica y mesoescala. También se debe considerar que el Radiosonda tiene un radio de representatividad de 200 km, y aunque la distancia en línea recta hasta Concón es de 80 km aproximadamente, existen diferencias importantes por topografía. En el capítulo siguiente se realizan recomendaciones como la instalación de una estación en altura en la zona de estudio, campañas de globosonda y/o contar con un perfilador vertical con mayor resolución temporal.

La torre meteorológica Principal ubicada en el Complejo Industrial Ventanas en la comuna de Puchuncaví, entrega información sólo hasta 40 m. s.n.s. A excepción del periodo nocturno en que se presentan frecuentes inversiones térmicas radiativas, la altura de la capa de mezcla se encuentra típicamente sobre el nivel más alto que mide la torre.

Se usará también la información meteorológica que proporcionan en la actualidad las estaciones de monitoreo de superficie en las comunas ubicadas en la zona de estudio.

Sería muy importante también contar con una estación meteorológica instalada sobre un cerro en la zona de estudio, de acuerdo con la experiencia del equipo consultor que ha comprobado la gran utilidad de contar con este tipo de información meteorológica para el estudio, seguimiento, análisis y pronóstico de las condiciones meteorológicas de ventilación[12] ante la ausencia de datos del perfil vertical de temperatura y viento[13][14].

3 Producto ii: Sugerencias sobre la medición de nueva información meteorológica y sus costos de implementación y operación

3.1 Justificación de sugerencias para nueva información meteorológica

Considerando los objetivos del estudio y la utilidad futura de sus resultados en términos de su potencial uso con fines de pronóstico de condiciones de ventilación y de modelación de calidad del aire, es que se requiere información adicional, tanto para el diagnóstico de las condiciones meteorológicas, como para su pronóstico.

El monitoreo meteorológico de las redes existentes en las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví entrega información de superficie que requiere ser ampliada incorporando sensores en las mismas estaciones para complementar las mediciones actuales, de modo de obtener información faltante de temperatura, humedad relativa y presión, principalmente, todas éstas son variables que contribuyen a la modulación de las condiciones de ventilación.

Para vigilancia meteorológica y pronóstico de la vaguada costera, la cual se desplaza típicamente de Norte a Sur se sugiere incorporar una estación en el sector de Pichidangui.

Paralelamente, y complementando las mediciones de superficie, es necesario incluir nueva información de meteorología en altura, de modo de contar con perfiles de temperatura y viento a distintos niveles parar determinar la altura de la capa de mezcla, estabilidad atmosférica y factor

[12] Estación de Lo Prado, sobre el Cerro San Francisco en la Región Metropolitana de Santiago; Estación meteorológica Oyama ubicada sobre el Cerro Ñielol en Temuco.

[13] Rutllant J,: Meteorological Air Pollution Potencial for Santiago, Chile: Towards an Objective Episode Forecasting_Pag.12 (6. Continuous Meteorological MonitoringNear the 900 hPa Level)

[14] Rutllant J,: Pronóstico objetivo del Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica. 1997

de ventilación. Para esto, se proponen alternativas que incluyen perfiladores verticales, campañas de radiosonda y estaciones meteorológica en altura geográfica (cerros).

3.2 Propuesta de mejoramiento a la red de estaciones de superficie

3.2.1 Mejoras en las Actuales Estaciones Meteorológicas

En la Tabla 3-1 se presentan las variables meteorológicas medidas actualmente en las estaciones de monitoreo de calidad de aire y meteorología.

Tabla 3-1Variables Meteorológicas por Estación de Monitoreo de Calidad de Aire y Meteorología

	ESTACION	Altura msmm	VV, DV	Temp	HR	P Atm	Lluvia	RS
Puchuncaví	Puchuncaví	35						
	La Greda	3						
	Maitenes	37						
	Valle Alegre	21						
	Ventanas	45						
Quintero	Sur	61						
	Quintero	61						
	Quintero Centro	28						
	Loncura	40						
Concón	Colmo	15						
	Concón	66						
	Junta de Vecinos	71						
	Las Gaviotas	73						
		= Medición Activa						

Fuente: Elaboración propia con datos MMA

De acuerdo a la Tabla 3-1 las estaciones de calidad de aire y meteorológicas de superficie de las comunas de Quintero y Puchuncaví, excepto Loncura, no cuentan con sensores de temperatura y humedad relativa. Estas variables son de importancia para el análisis y seguimiento a escala local de las brisas mar-tierra y valle-montaña durante el día, y en el periodo nocturno montaña-valle y tierra-mar. Es necesario también contar con sensores de presión atmosférica, para complementar, por ejemplo, el seguimiento de la evolución de las bajas costeras, aproximaciones frontales e incursiones de altas frías migratorias.

Las sugerencias que se visualizan como complementarias son las siguientes:

3.2.1.1 Sensor combinado de Temperatura y Humedad del Aire

Se sugiere el uso de un sensor combinado de temperatura y humedad el aire, de uso normal en meteorología, cuyas principales características sean:

- Temperatura: tipo de sensor termistor, rango -40 a +60°C, precisión ± 0.2 °C

- Humedad: tipo de sensor polímetro capacitor o equivalente, rango 0 a 100%, precisión ±2%.
- Salida en voltaje, compatible con el datalogger existente en cada una de las estaciones.
- Disponer de un sistema de ajuste de calibración tanto para la temperatura como para la humedad relativa. La calibración de este sensor debería realizarse a lo menos anualmente utilizando aparatos certificados.

3.2.1.2 Protector contra Radiación

Para este efecto se sugiere el uso de un protector de radiación de ventilación natural, de tamaño acorde con el sensor que se implemente, similar al presentado en la Figura 3-1.

Figura 3-1 Imagen de sensor de temperatura y humedad del aire con protector de radiación con ventilación natural

Fuente: Catálogo del fabricante

3.2.1.3 Incorporación del Cálculo del Sigma Theta en las variables de la estación

Se define el sigma theta como la desviación estándar de la dirección del viento en acimut (ángulo horizontal expresado en grados), recomendado en diversas publicaciones como uno de los métodos para caracterizar la estabilidad atmosférica. Para este propósito se recomienda que la desviación estándar sea calculada utilizando el método de Yamartino[15]. Considerando que la estación meteorológica está provista de un adquisidor de datos (datalogger) marca Campbell Scientific Inc., modelo CR1000, el cual trae incorporado el algoritmo de cálculo dentro de su firmware, se sugiere modificar su programación activando la opción que incorpora el cálculo del sigma theta entre los valores que se registren[16].

[15]Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, February 2000.
[16]CR1000 Measurement and Control System, Campbell Scientific Inc., 2013

Costos Asociados

El costo asociado a la incorporación de un sensor combinado de temperatura y humedad del aire y su correspondiente protector contra radiación es marginal respecto al monto total de los equipos con que cuenta cada estación, por lo que este se podría haber considerado desde el comienzo de las mediciones.

En el mercado existen diversas marcas y modelos de este tipo de sensores, entre ellos: RM Young, Vaisala, MetOne entre otros, y los mismos proveedores además cuentan con el dispositivo protector contra radiación, acordes con el tamaño y formas del sensor.

En la Tabla 3-2 se presentan los costos asociados de implementación para la medición combinada de temperatura y humedad del aire.

Tabla 3-2 Costos de implementación medición combinada de temperatura y humedad

			Precio Estimado en USD	
Items	Cantidad	Descripción	Unitario	Total
1	8	Sensor Combinado de temperatura y humedad del aire, salida en voltaje compatible con datalogger CR1000 existente.	952	7.616
2	8	Protector radiación con ventilación natural para sensor combinado de temperatura y humedad del aire	357	2.856
3	8	Instalación de los nuevos sensores y modificar programación de los datalogger	120	960
		Costo Total Estimado		**11.432**

Fuente: Proveedores de equipos en Chile

Es importante que al momento de realizar la compra se considere que los sensores de ambas variables sean con salida análoga en voltaje, de modo que puedan ser compatibles directamente con los datalogger existentes, ya que si bien estos corresponden a un modelo discontinuado por su fabricante, aún se encuentran en plena vigencia.

Se debería realizar el montaje en las actuales torres y modificar la programación de los datalogger incorporando estas dos nuevas variables; además de incorporarlas en la plataforma de visualización de los datos en línea.

Relativo al costo asociado a la habilitación de este cálculo, no debiera ser significativo, ya que sólo se debe modificar la programación de cada datalogger de las estaciones que miden viento, activando la instrucción pertinente, lo cual puede inclusive realizarse en forma remota, si es que el sistema permite comunicación en ambos sentidos, para posteriormente incorporar dicho valor en la plataforma de visualización de datos en línea. Siendo esto último lo que pudiese presentar un mayor grado de complejidad, se estima que el costo total debiese ser del orden de USD 1500.

3.2.2 Mejoramiento Torre Meteorológica Principal

La torre meteorológica, existente en Codelco Ventanas en la Comuna de Puchuncaví, mide viento, humedad y temperatura a 10, 20 y 40 metros. Ha mostrado ser de utilidad para detectar la formación y disipación de inversiones térmicas entre la superficie y 40 metros, correspondiendo en la mayoría de los casos a inversiones radiativas, determinadas por enfriamiento nocturno en condiciones de cielo despejado. Esta configuración acoplada a la brisa nocturna tierra a mar con componente Este, permite también evaluar la probabilidad de impactos en la localidad de Quintero de emisiones provenientes del complejo industrial Puchuncaví por efecto del viento.

Sin embargo, la torre tiene la limitación de no entregar información sobre los 40 metros. Esto es de particular importancia, ya que en la zona de estudio la inversión disipa cuando comienza el calentamiento diurno, coincidente o muy próximo al periodo de cambio en la dirección del viento desde la componente Este del periodo nocturno, a la dirección Oeste de la brisa diurna de mar a tierra y que típicamente impacta primero la estación Los Maitenes en la Comuna de Puchuncaví.

La inversión radiativa suele estar acoplada a la inversión de subsidencia. En estos casos, después de desaparecer la estabilidad bajo los 40 metros, la base de la inversión de subsidencia puede encontrarse ligeramente sobre ese nivel, para erosionarse desde debajo de acuerdo con el calentamiento de la superficie. De no detectarse adecuadamente esta condición, pueden registrarse episodios de contaminación no previstos en la Comuna de Puchuncaví.

Lo anterior refuerza la necesidad de contar con un perfilador vertical que proporcione información del gradiente vertical de temperatura, altura de la capa de mezcla y viento.

3.2.2.1 Especificaciones Torre Meteorológica

Es una estación micro meteorológica destinada a la medición continua de diversas variables meteorológicas, a través de un adquisidor de datos marca Campbell Scientific modelo CR1000.

Consta de una torre de acero de 40 metros de alto, con sensores dispuestos a 2, 10, 20 y 40 metros sobre el nivel del suelo (ver Figura 3-2)

En la Tabla 3-3 se presentan las variables que son medidas a diversas alturas en la Torre Meteorológica, junto a las principales características técnicas de los sensores que la componen.

Tabla 3-3 Características Torre Meteorológica actual

Altura sobre nivel suelo	Variables Meteorológicas	Tipo de Sensor	Marca Modelo	Principal Característica
2 m	Lluvia	Canjilones	Texas Electronics Inc. TR-525M	Sensibilidad 0.1 mm
10 m	Dirección y Velocidad del Viento	Potenciómetro y Generador de voltaje	MetOne 014A y 024A	Umbral de Partida WS & WD: 0.45 m/s
	Temperatura y	Temperatura:	MetOne 083E-1-35	Rango (Precisión)

Altura sobre nivel suelo	Variables Meteorológicas	Tipo de Sensor	Marca Modelo	Principal Característica
	Humedad del Aire	Termistor Humedad: Polímero capacitor	con Protector de Radiación de Ventilación Natural	Temperatura: ±.15°C (0.27°C) Humedad: ±2.0% (0 – 100%)
20 m	Dirección y Velocidad del Viento	Potenciómetro y Generador de voltaje	MetOne 014A y 024A	Umbral de Partida WS & WD: 0.45 m/s
	Temperatura y Humedad del Aire	Temperatura: Termistor Humedad: Polímero capacitor	MetOne 083E-1-35 con Protector de Radiación de Ventilación Natural	Rango (Precisión) Temperatura: ±.15°C (0.27°C) Humedad: ±2.0% (0 – 100%)
	Presión Atmosférica	Piezoresistivo	MetOne 092	Rango 600 to 1100 hPa Resolución 0.1 hPa
	Radiación Solar Global	Celda fotovoltaica	Apogee Instruments Modelo PYR	Sensibilidad: 0.2 mVpor W/m²
40 m	Dirección y Velocidad del Viento	Potenciómetro y Generador de voltaje	MetOne 014A y 024A	Umbral de Partida WS & WD: 0.45 m/s
	Temperatura y Humedad del Aire	Temperatura: Termistor Humedad: Polímero capacitor	MetOne 083E-1-35 con Protector de Radiación de Ventilación Natural	Rango (Precisión) Temperatura: ±.15°C (0.27°C) Humedad: ±2.0% (0 – 100%)

Fuente: Elaboración propia basado en catálogos de especificaciones de los fabricantes

Figura 3-2 Vista general de la Torre Meteorológica

Fuente: Imagen Internet correspondiente a la Torre meteorológica Principal

3.2.2.2 Propuesta de cambio ubicación sensores para Torre meteorológica

Al ver la distribución de los sensores en dicha torre, y como una primera mejora, la cual no involucra realizar una inversión económica considerable, se sugiere cambiar de posición algunos de los sensores actualmente instalados a 20 m sobre el nivel del suelo, dejándolos a alturas que pueden fluctuar entre 1,5 a 2 m. Los sensores que se propone cambiar de lugar se indican la Tabla 3-4:

Tabla 3-4 Torre Meteorológica con Distribución de Equipos Existentes Optimizada

Altura sobre nivel suelo	Variables Meteorológicas	Tipo de Sensor	Marca Modelo	Principal Característica
2 m	Presión Atmosférica	Piezoresistivo	MetOne 092	Rango 600 to 1100 hPa Resolución 0.1 hPa
	Radiación Solar Global	Celda fotovoltaica	Apogee Instruments Modelo PYR	Sensibilidad: 0.2 mV per W m-2
	Lluvia	Canjilones	Texas Electronics Inc. TR-525M	Sensibilidad 0.1 mm
10 m	Dirección y Velocidad del Viento	Potenciómetro y Generador de voltaje	MetOne 014A y 024A	Umbral de Partida WS & WD: 0.45 m/s
	Temperatura y Humedad del Aire	Temperatura: Termistor Humedad: Polímero capacitor	MetOne 083E-1-35 con Dispositivo Protector de Radiación de Ventilación Natural	Rango (Precisión) Temperatura: ±.15°C (0.27°C) Humedad: ±2.0% (0 – 100%)
20 m	Dirección y Velocidad del Viento	Potenciómetro y Generador de voltaje	MetOne 014A y 024A	Umbral de Partida WS & WD: 0.45 m/s
	Temperatura y Humedad del Aire	Temperatura: Termistor Humedad: Polímero capacitor	MetOne 083E-1-35 con Protector de Radiación de Ventilación Natural	Rango (Precisión) Temperatura: ±.15°C (0.27°C) Humedad: ±2.0% (0 – 100%)
40 m	Dirección y Velocidad del Viento	Potenciómetro y Generador de voltaje	MetOne 014A y 024A	Umbral de Partida WS & WD: 0.45 m/s
	Temperatura y Humedad del Aire	Temperatura: Termistor Humedad: Polímero capacitor	MetOne 083E-1-35 con Protector de Radiación de Ventilación Natural	Rango (Precisión) Temperatura: ±.15°C (0.27°C) Humedad: ±2.0% (0 – 100%)

Fuente: Elaboración propia basado en catálogos de especificaciones de los fabricantes

Los cambios que se sugieren se fundamentan en lo siguiente:

a) Sensor de Radiación Solar instalado a 20 m sobre el nivel del suelo

Si bien no está establecida una altura estándar para la instalación de este sensor, el estar situado en una torre a 20 m de altura dificulta las labores de mantenimiento rutinario que este tipo de sensor requiere, entre ellos: limpieza periódica de la celda fotovoltaica para evitar que la

acumulación de polvo afecte la medida, además de verificar la nivelación del sensor a través del nivel de burbuja que el propio aparato trae incorporado.

b) Sensor de Presión Atmosférica instalado a 20 m sobre el nivel del suelo

Si bien el sensor utilizado cuenta con un dispositivo de protección, en las mediciones de presión atmosférica en una torre a 20 metros de altura el viento puede provocar cambios dinámicos en la presión del aire, podría incidir en que las lecturas barométricas sean inexactas. Estas fluctuaciones del viento se superponen a la presión estática y, con viento fuerte y arrachado, pueden incrementar entre a 2 a 3 hPa las mediciones que se realicen[17].

c) Incorporación del Cálculo del Sigma Theta

Desarrollado en punto anterior "Mejoras en las actuales estaciones meteorológicas"

Costos Asociados

Como se indicara anteriormente, la implementación de las mejoras sugeridas no representan costos adicionales importantes, debido a que se utilizarían los mismos elementos existentes, y podría realizarse al momento de efectuarse la próxima mantención preventiva a la estación, proceso en el cual necesariamente deben desmontarse tales sensores.

De realizarse fuera del periodo de mantenimiento preventivo, el desarrollo de esta actividad debería poder desarrollarse entre 1 a 2 jornadas de trabajo (8 horas x jornada) de dos especialistas, y su costo debiera ser del orden de los USD 3.000 incluyendo los materiales menores a utilizar.

3.2.2.3 Otras Mejoras en la Estación Torre Meteorológica

Para mejorar el grado de sensibilidad en algunas de las variables que se miden en la torre, se sugiere el reemplazo de algunos de sus sensores por otros de mejor calidad, entre ellos:

a) Sensores para Medición de Gradiente Vertical de Temperatura

En la actualidad, estas mediciones se realizan utilizando sensores de uso común en meteorología, los cuales están provistos de un termistor como elemento sensible.

Para mediciones de gradiente vertical de temperatura se recomienda[18] el uso de sensores de temperatura de mayor sensibilidad y de respuesta rápida, como son aquellos que utilizan un dispositivo RTD basados en resistencia de platino, como elemento sensible.

En la actualidad, en el mercado hay diversos fabricantes de sensores meteorológicos para esta aplicación específica, entre ellos: Vaisala, RM Young, MetOne, entre otros.

[17]Quality Assurance Hand Book for Air Pollution Measurement Systems, Volume IV: Meteorological Measurements, Version 2.0 (Final), EPA-454/B-08-002, March 2008

[18]Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications US EPA, Office of Quality Planning and Standards, USA, February 2000

b) Reemplazo de los Protectores de Radiación con Ventilación Natural por aquellos de Ventilación Forzada

En la actualidad, los sensores de temperatura y humedad del aire están provistos de dispositivos protectores de radiación de ventilación natural, los cuales bajo condiciones de vientos de baja velocidad presentan el inconveniente del estancamiento del aire dentro de él, entregando una medida que pudiese no ser la real; lo cual afecta las medidas de gradiente vertical de temperatura.

Para evitar este defecto, los mismos fabricantes de sensores meteorológicos también comercializan dispositivos protectores de radiación de aspiración forzada, los cuales están provistos de un pequeño ventilador que hace circular el aire dentro del protector.

Comercialmente se encuentran dispositivos para ser energizados con 220 VAC y 12 VDC, por lo que se sugiere la implementación de aquellos de 12 VDC debido a que permiten que el suministro de energía sea respaldado por un sistema de baterías y paneles solares ante eventuales cortes en el suministro eléctrico.

Por otra parte, este tipo de dispositivos, por tener piezas móviles, requiere de una mantención más rigurosa que el protector tradicional a fin de evitar la acumulación de polvo e insectos que pudiesen trabar las aspas del ventilador.

c) Sensores de Viento de Mayor Sensibilidad

Los actuales sensores de dirección y velocidad del viento se caracterizan por tener un umbral de sensibilidad de 0,45 m/s lo cual no es lo óptimo para la aplicación específica que se les está dando.

Ante ello se sugiere su eventual reemplazo por aquellos de mayor grado de sensibilidad, con un umbral de partida igual o inferior a 0,20 m/s. De este tipo de sensores últimamente la industria ha desarrollado aquellos del tipo sónico los cuales presentan la gran ventaja de no tener piezas móviles; además, su precio actual es comparable con los sensores tradicionales de alta calidad.

En el mercado existen diversos fabricantes para este tipo de sensores, entre ellos RM Young (USA), Gill Instruments Limited (UK), MetOne (USA), Lufft (CEE), entre otros.

Costos Asociados

En

Tabla 3-5 se presenta una estimación de los valores asociados a la adquisición de cada uno de los componentes mencionados en los párrafos anteriores:

Los actuales sensores combinados de temperatura y humedad podrían ser utilizados en aquellas estaciones de la red de monitoreo que no disponen de ellos.

Tabla 3-5 Estimación de costo para mejoramiento de Torre Meteorológica

Componente	Cantidad	Valor Unit.	Valor Total USD
Sensores para Medición de Gradiente Vertical de Temperatura, incluye cable	3	USD 1.800	USD 5.400
Protectores de Radiación con Ventilación Forzada	3	USD 1.200	USD 3.600
Sensor Sónico de alta precisión	3	USD 5.700	USD 17.100
Instalación y Puesta en Servicio	1	USD 2.000	USD 2.000
Costo Total Estimado			**USD 28.100**

Fuente: Proveedor de equipos en Chile

3.2.3 Estación Meteorológica en zona Norte con fines de vigilancia y pronóstico

No hay en la actualidad estaciones meteorológicas con información en línea entre Viña del Mar (Torquemada) y La Serena separadas por una distancia de 350 km en línea recta entre ambas localidades. En base a la experiencia del equipo consultor se recomienda instalar una estación en Pichidangui (ubicada a unos 100 km al norte de Torquemada) en consideración a que CENMA[19] instaló una estación en ese lugar, y proporcionaba información relevante para el seguimiento de la evolución de las vaguadas costeras y otras configuraciones de interés con fines de pronóstico de episodios de contaminación. Durante el proceso de formación de las bajas costeras se registraban anomalías positivas de la intensidad del viento superficial del sur y sureste, además del comportamiento de la presión, temperatura, humedad y cobertura nubosa en la evolución de esta.

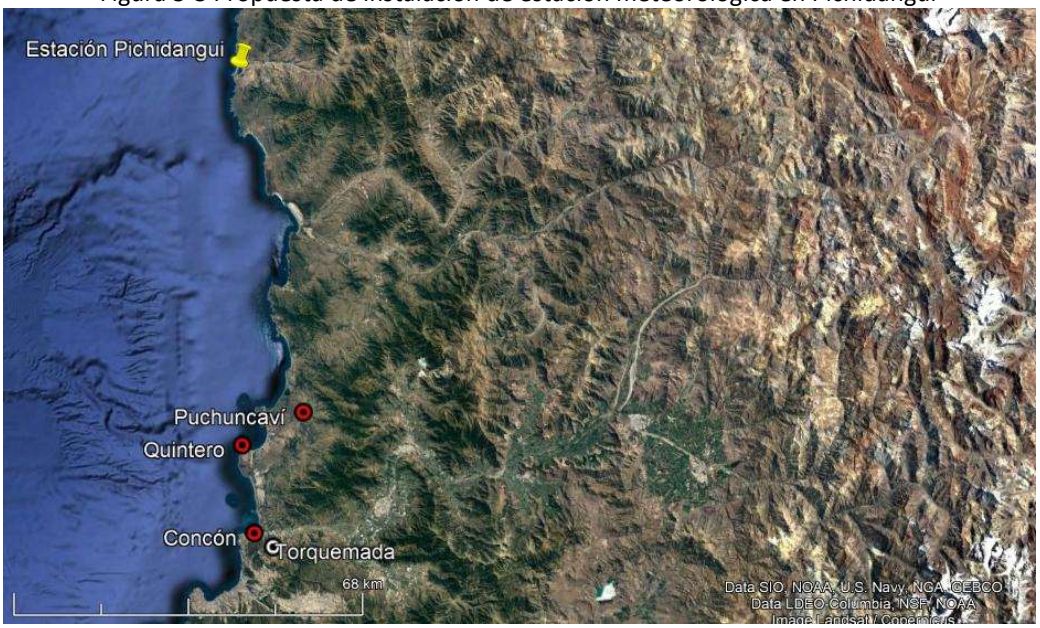
La Figura 3-3 ilustra la ubicación de la instalación de una estación en Pichidangui respecto a las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví

Equipamiento propuesto: Estación meteorológica básica (temperatura, humedad, viento) más presión atmosférica.

Especificaciones Técnicas: Los componentes de esta estación deberían ser similares a los descritos para la Estación Meteorológica de Altura Geográfica.

[19] Pronóstico diario de condiciones meteorológicas asociadas a episodios de contaminación atmosférica (PM 10) en Santiago. Periodo Marzo-septiembre. Proyecto desarrollado por CENMA para CONAMA RM años 1997 a 2003.

Figura 3-3 Propuesta de instalación de estación meteorológica en Pichidangui



Fuente: elaboración propia en Google Earth

Costos asociados

La diferencia de costos de esta estación en Pichidangui respecto a la Estación Meteorológica de Altura Geográfica, radica en los gastos derivados del traslado y estadía del personal técnico dedicado a la operación y mantenimiento.

Tabla 3-6 Equipamiento y Costos para implementación de estación meteorológica en Pichidangui

			Precio Estimado en USD	
Items	Cantidad	Descripción	Unitario	Total
1	1	Estación Meteorológica Automática provista de: Datalogger, sensores de dirección y velocidad del viento, temperatura y humedad del aire, radiación solar global, presión atmosférica y lluvia. Fuente de alimentación basada en energía renovable.	20.000	20.000
2	1	Dispositivos de transmisión de datos: Router, antena Yagui, sistema de energía independiente al de la estación meteorológica.	1.500	1.500
3	1	Cerco perimetral basado en malla de acero galvanizado con protección anti corrosión, de 4 x 4 y 2 m de alto. Incluye traslado e instalación.	10.000	10.000
4	1	Instalación y puesta en servicio de la estación meteorológica, incluye traslado de equipos.	5.500	5.500
5	1	Costo operacional anual, incluye mantención preventiva.	13.000	13.000
		Costo total estimado USD		50.000

Fuente: Proveedor de equipos en Chile

3.3 Propuestas para mejoramiento de la información meteorológica en altura

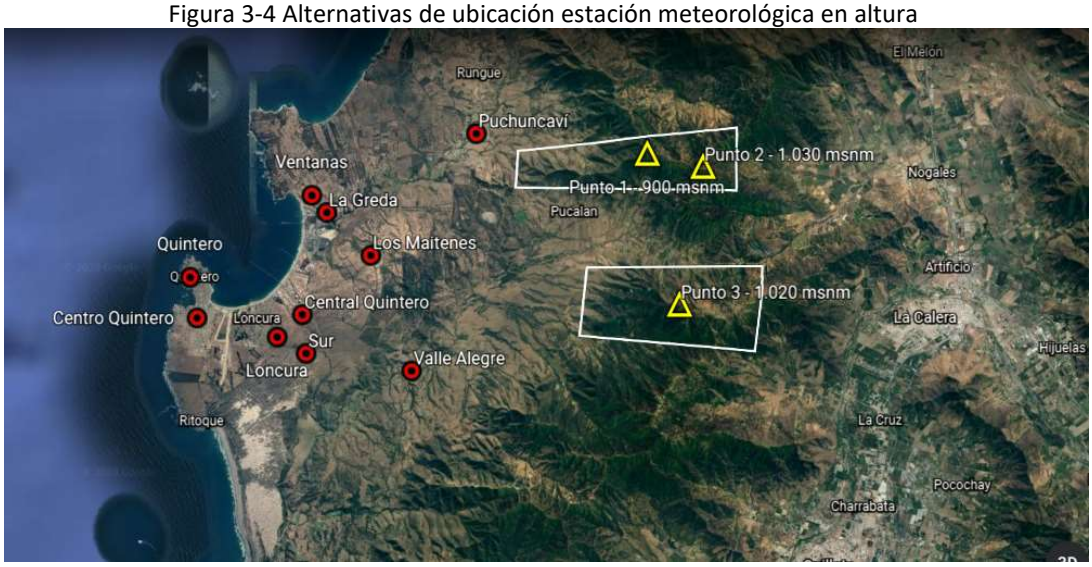
3.3.1 Estación Meteorológica en Altura Geográfica

Las estaciones meteorológicas instaladas en altura sobre cerros como las ubicadas en Lo Prado (Cerro San Francisco) y La Dormida (cuesta La Dormida camino a Olmué), han mostrado ser de gran utilidad para el estudio, análisis, seguimiento y pronóstico de las condiciones meteorológicas de ventilación y determinación de índices de estabilidad. Similar utilidad demostró tener la estación de Oyama[20] en Temuco para el pronóstico de episodios por material particulado MP10 y MP2,5 para esa zona.

Por este motivo, se sugiere la instalación de una estación meteorológica en altura, con comunicación en línea para los diferentes parámetros meteorológicos, idealmente a una altura similar a la de la estación de Lo Prado, aproximadamente 1000 m.s.n.m.; esto porque climatológicamente corresponde al nivel medio del tope de la inversión de subsidencia asociada al anticiclón Semipermanente del Pacífico Suroriental.

A continuación, en la Figura 3-4 se presenta un mapa con posibles ubicaciones para instalar la estación meteorológica en altura en la zona de estudio.

Figura 3-4 Alternativas de ubicación estación meteorológica en altura



Fuente: Elaboración propia usando Google Earth

Se proponen preliminarmente, 3 alternativas de ubicación estación meteorológica en altura, todas a una altura aproximada de 1000 msnm.

El Punto 1 y Punto 2 se encuentran en la misma cadena de cerros; al norte de la ruta F-20. El Punto 3 se encuentra en otro cerro, al sur de la ruta F-20.

[20] Estación instalada por CENMA para el pronóstico de episodios por material particulado MP10 y MP2,5 en Temuco.

Por lo que se pudo apreciar con la herramienta Google Earth, los Puntos 1 y 2 presentan mejores condiciones de accesibilidad, con caminos oficiales. El punto 3 presenta una pendiente mayor y un camino menos marcado, pero al parecer igualmente posible. En ninguno de los 3 puntos se observan torres eléctricas o de telefonía cercanas.

La Tabla 3-7 resume la altitud y distancia a centro poblado La Greda y Centro Quintero de los 3 puntos propuestos para instalación de una estación meteorológica en cerros.

Tabla 3-7 Altitud y distancias de referencia para puntos propuestos

	Punto 1	**Punto 2**	**Punto 3**
Altitud	900 msnm	1.030 msnm	1.020 msnm
Distancia a La Greda	13,8 Km	16,02 Km	15,5 Km
Distancia a Centro de Quintero	19,8 Km	21,8 Km	20,03 Km

Nota: Altitud y distancias de referencia

Especificaciones Técnicas

Las características técnicas de las estaciones meteorológicas que se propone implementar para mejorar el diagnóstico y pronóstico futuro del factor de ventilación y la calidad del aire son las siguientes:

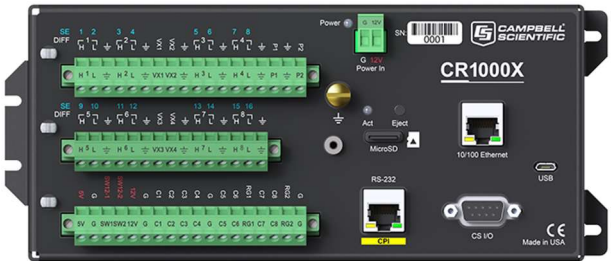
a) Adquisidor de Datos (datalogger)

Para mantener la compatibilidad con el sistema existente, se recomienda el uso de la misma marca y modelo de datalogger, Campbell Scientific Inc. Modelo CR1000X (el modelo CR1000 actualmente en uso fue discontinuado por su fabricante hace algunos años).

El adquisidor de datos es el componente principal en una estación meteorológica ya que permite el conexionado y configuración de los diversos sensores que la componen, permitiendo además el almacenamiento de datos y la transmisión de ellos a través de un router mediante telefonía celular o satelital.

Este lleva diversos elementos complementarios que se detallan en el cuadro siguiente, entre ellos: gabinete hermético, fuente de poder, panel solar batería recargable de libre mantención entre otros.

Figura 3-5 Ejemplo de datalogger



Fuente: Catálogo del fabricante

b) Sensores Meteorológicos

La estación meteorológica que se propone implementar deberá contar con sensores para medir a lo menos las siguientes variables meteorológicas:

- Dirección y velocidad del viento
- Temperatura y humedad del aire
- Radiación solar global
- Presión atmosférica
- Lluvia

c) Cerco Perimetral

Por estar en un lugar aislado, se recomienda que la estación esté provista de un cerco perimetral de buena calidad a fin de prevenir el acceso de terceros y la eventual ocurrencia de actos vandálicos o robos.

Costos Asociados

En la Tabla 3-8 se presentan los principales componentes para una estación meteorológica en altura y una valoración aproximada de su implementación, incluyendo el costo de instalación, operación y mantenimiento preventivo anual.

Tabla 3-8 Equipamiento y Costos para implementación de estación meteorológica en altura

			Precio Estimado en USD	
Items	Cantidad	Descripción	Unitario	Total
1	1	Estación Meteorológica Automática provista de: Datalogger, sensores de dirección y velocidad del viento, temperatura y humedad del aire, radiación solar global, presión atmosférica y lluvia. Fuente de alimentación basada en energía renovable.	20.000	20.000
2	1	Dispositivos de transmisión de datos: Router, antena Yagui, sistema de energía independiente al de la estación meteorológica.	1.500	1.500
3	1	Cerco perimetral basado en malla de acero galvanizado con protección anti corrosión, de 4 x 4 y 2 m de alto. Incluye traslado e instalación.	9.000	9.000
4	1	Instalación y puesta en servicio de la estación meteorológica, incluye traslado de equipos.	4.500	4.500
5	1	Costo operacional anual, incluye mantención preventiva.	12.000	12.000
		Costo total estimado USD		47.000

Fuente: Proveedor de equipos en Chile

3.3.2 Campaña Globo cautivos

Respecto al uso de globos cautivos que aportan información a la caracterización del factor de ventilación asociado a las distintas configuraciones meteorológicas, se indica:

Principales ventajas:

- Permite realizar mediciones hasta alrededor de 1.000 m sobre el suelo.
- Velocidad de ascenso y descenso controlada, lo cual permite la obtención de una mayor cantidad de datos.
- Su implementación es de bajo costo en comparación a los otros sistemas de medición.
- Permite depurar datos erróneos al contrastar los perfiles verticales de las variables recogidas en el ascenso con los obtenidos en el descenso del globo.
- No requiere disponer de una infraestructura especial para la recepción de los datos.
- Sistema de fácil transporte, ideal para campañas de mediciones en varios sitios.

Desventajas:

- La altura que alcancen los sensores está definido por la longitud del cable que sujeta el globo.
- No permite detectar espesores de la capa límite en condiciones fuertemente convectivas en las que la inversión térmica suele encontrarse por encima del alcance del equipo.
- Su operación requiere de la participación de varias personas.
- Su uso se dificulta con vientos de mayor intensidad que le impidan alcanzar alturas mayores.
- Su uso se dificulta en días con niebla o precipitación por falta de visibilidad del equipo.
- Para el desarrollo de mediciones continuas, su principal limitante se relaciona con la duración de las baterías que energizan los diversos sensores.
- El sistema de huinche para el ascenso y descenso del globo requiere de mantenimiento mecánico periódico.
- No permite el desarrollo de mediciones continuas en forma permanente.
- Por ser mediciones discretas, no permite la incorporación directa de la data en una plataforma en línea.

Hay estudios realizados en Chile[21] en los cuales se ha comparado el globo cautivo con un perfilador del tipo SODAR con resultados favorables para el globo cautivo. En caso de recursos económicos limitados, un globo cautivo podría ser una alternativa a la adquisición de un perfilador vertical, con campañas de mediciones de 6 a 10 lanzamientos contra pronóstico, a fin de caracterizar cuantitativamente cada una de las configuraciones, y extrapolarlas para el resto del periodo de

[21] "Habilitación y validación de equipo SODAR para medición de perfiles verticales de viento", Tesis para optar al grado de Magíster en Meteorología y Climatología, Nicolás Andrés Donoso Castro, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geofísica, Chile, 2017

pronóstico. Su fácil movilidad constituye un adecuado elemento de apoyo en el desarrollo de campañas de mediciones complementarias en sectores de interés para el pronóstico meteorológico, principalmente en aquellos periodos del año de mayor frecuencia de episodios críticos. También su uso podría servir de apoyo en la validación de los datos continuos que se obtengan con el equipo SODAR (perfilador vertical sugerido). Sin embargo, por las dificultades operacionales que presenta, su uso permanente no es viable.

En la Figura 3-6 se muestra imagen de un sistema de globo cautivo con sensores meteorológicos.

Figura 3-6 Globo cautivo (Fuente: catálogo del fabricante)

Fuente: internet

Costos asociados

En la Tabla 3-9 se presenta el costo estimado de implementación de un sistema de globo cautivo

Tabla 3-9 Costo estimado de implementación de un sistema de globo cautivo

Componente	Valor	
Sistema de Medición Globo Cautivo	USD	18.000
Carro de arraste para traslados	USD	4.000
Instalación y Puesta en Servicio	USD	2.000
Costo operacional anual, incluye mantención preventiva.	USD	4.000
Costo Total Estimado	**USD**	**28.000**

Fuente: Proveedor de equipos en Chile

3.3.3 Perfilador Vertical

De acuerdo con la literatura científica nacional existe consenso en cuanto a que el factor meteorológico de ventilación (FV) asociado a calidad de aire está determinado por la altura de la capa de mezcla (H) y el viento medio dentro de la misma (V)[22]. La ecuación es FV= H*V.

En la actualidad en la zona de estudio no se cuenta con un equipo operativo para determinar el FV en línea para efecto de seguimiento de las condiciones de ventilación, análisis y pronósticos.

Se sugiere por lo tanto, como primera prioridad, contar en la zona con un sondeador vertical capaz de entregar en tiempo real las características en cuanto a la evolución del gradiente vertical de temperatura, altura de la capa de mezcla y viento dentro de la misma. Se propone como una alternativa, instalarlo en una ubicación despejada dentro de la base aérea de Quintero.

En el mercado se comercializan diversos sistemas de medición de perfil vertical, de ellos los de uso más generalizado son:

- Nefobasímetro
- WINDCUBE®
- LAP-RASS

3.3.3.1 Nefobasímetro

Es un instrumento que utiliza metodología LIDAR (Light Detection and Ranging) diseñado inicialmente para la determinar la altura de la base de la nubosidad. En la actualidad se aplica en la determinación de la altura de la base de la capa de inversión. En Chile se han desarrollado estudios utilizando Nefobasímetro[23] y otros sistemas LIDAR[24].

Sus principales ventajas son:

- Permite el desarrollo de mediciones continuas.
- Alcanza alturas desde el nivel de superficie hasta 3. 5 km de altitud
- Por su tamaño y peso es un equipo transportable

Y sus desventajas son:

- Presenta errores en las mediciones en días con lluvia, niebla o nubosidad baja, por lo que su uso no sería el más adecuado en zonas costeras en donde las nieblas matinales y nubosidad baja son frecuentes.

[22] Rutllant J; Salinas H; 1983

[23] "Aplicaciones de Nefobasímetros DGF en la caracterización de las capas de aerosoles sobre Santiago", Ricardo Muñoz M., Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Chile, 2020.

[24] "Variability of Urban Aerosols over Santiago, Chile: Comparison of Surface PM10 Concentrations and Remote Sensing with Ceilometer and Lidar", Ricardo C. Muñoz, Ricardo I. Alcafuz, Aerosol and Air Quality Research, 12: 8–19, 2012

En la Figura 3-7 se muestra imagen de un equipo nefobasímetro.

Figura 3-7 Imagen de un Nefobasímetro

Fuente: internet

Costos asociados

En la Tabla 3-10 se presenta el costo estimado de implementación de un Nefobasímetro en la zona

Tabla 3-10 Costo estimado de implementación de un Nefobasímetro

Componente	Valor	
Provisión de Equipo Nefobasímetro	USD	40.000
Capacitación a operadores en instalación y mantenimiento básico	USD	6.000
Costo anual por mantenimiento preventivo mayor	USD	4.000
Costo Total Estimado	**USD**	**50.000**

Fuente: Proveedor de equipos en Chile

3.3.3.2 Equipo WINDCUBE®

Es un equipo que utiliza la metodología LIDAR para realizar mediciones de perfil de dirección y velocidad del viento, permitiendo el desarrollo de mediciones continuas en forma automática, entregando perfiles verticales continuos y en tiempo real hasta altitudes entre 3 y 10 km aproximadamente, según configuración. Permite realizar mediciones de perfil de viento en 12 niveles de altitud en un rango de detección de 0 a 60 m/s.

En la Figura 3-8 se muestra imagen de este equipo:

Figura 3-8 Imagen del equipo WINDCUBE®

Fuente catálogo de fabricante

Como equipo de medición, presenta las siguientes ventajas:

- Permite realizar mediciones hasta una altura aproximada de 10 km sobre el nivel del suelo, por su tamaño y peso (54 kg) es de fácil transporte, por lo que podría ser trasladado fácilmente para realizar mediciones en zonas de mayor altura geográfica.
- Puede ser energizado mediante fuentes de energía renovables, lo cual permitiría su uso en zonas en donde no se dispone de suministro eléctrico.
- Los datos pueden ser transmitidos en forma remota mediante enlace de telefonía celular o satelital.
- No requiere de personal permanente en terreno durante su operación.

Sus desventajas son:

- No realiza mediciones en los primeros 40 sobre el nivel del suelo.
- Por ser un sistema que transmite hacia la atmósfera un haz luminoso, emitido por un láser pulsado, el cual sufre dispersión por la presencia de moléculas del aire, gotitas de lluvia y aerosoles en la capa límite, este instrumento es más sensible a determinar la base de la capa límite que el tope de ella.
- No permite obtener mediciones de gradiente vertical de temperatura.

Costos Asociados

En la Tabla 3-11 se presenta un cuadro con la estimación de costos de implementación del equipo WINDCUBE®

Tabla 3-11 Costo estimado de implementación del equipo WINDCUBE®

Componente	Valor	
Provisión de Equipo WINDCUBE®	USD	630.000
Capacitación a operadores en instalación y mantenimiento básico	USD	15.000
Costo anual por mantenimiento preventivo mayor	USD	8.000
Costo Total Estimado	**USD**	**653.000**

Fuente: proveedor de equipo WINDCUBE en Chile

3.3.3.3 Equipo LAP RASS

El LAP es un equipo perfilador de viento por radar que entrega mediciones continuas de perfiles verticales en tiempo real de magnitud del viento horizontal, dirección del viento, magnitud frl viento vertical y turbulencia en la capa límite atmosférica.

La opción RASS (Radio Acoustic Sounding System), es un complemento del equipo LAP que permite medir el perfil de temperatura en un rango de altura entre 100 a 1.500 m sobre el nivel del suelo.

En la Figura 3-9 se muestra una imagen de este equipo:

Figura 3-9 Imagen del equipo LAP-300 con accesorio RASS

Fuente: Catálogo de fabricante

Las principales ventajas de este equipo, complementado con la opción RASS, son las siguientes:

- La altura de la capa de mezcla
- Gradiente vertical de temperatura, y clasificación de la estabilidad vertical en capas estables, neutras o inestables
- Velocidad del viento (dirección y magnitud)
- Velocidad vertical del viento w
- Niveles en que se detecten inversiones térmicas
- Desviación standard de la dirección del viento y de la velocidad vertical w.
- Mediciones hasta 1500 metros de altura, resolución de 50 metros a partir de los 20 metros sobre el nivel de superficie
- Visualización en línea de los datos en forma remota, desde distintos lugares que determine el MMA, con despliegue gráfico del perfil de temperatura, altura de la capa de mezcla y viento medio dentro de la misma.
- Los datos numéricos de las observaciones quedan almacenados en archivos secuenciales para posteriores análisis y/o estudios.

En cuanto a las desventajas, están su alto costo y el de requerir de profesionales altamente capacitados para su mantenimiento rutinario.

Costos Asociados

En la Tabla 3-12 se presenta el costo estimado de implementación del equipo LAP-RASS

Tabla 3-12 Costo estimado de implementación del equipo LAP-RASS

Componente	Valor	
Provisión de Equipo LAP	USD	400.000
Opción RASS	USD	120.000
Capacitación a operadores en instalación y mantenimiento básico	USD	50.000
Costo anual por mantenimiento preventivo mayor	USD	30.000
Costo Total Estimado	**USD**	**600.000**

Fuente: Proveedor de equipo LAP-RASS en Chile

3.3.4 Recomendaciones

Considerando los objetivos del estudio y la utilidad futura de sus resultados en términos de su potencial uso con fines de pronóstico de condiciones de ventilación y de modelación de calidad del aire, es que se requiere incorporar medición continua de altura de capa de mezcla, perfiles verticales tanto de temperatura como de viento con un rango de alcance superior a 1000 m.s.n.m. De acuerdo a la revisión de equipos disponibles en el mercado, el más adecuado correspondería al perfilador LAP-RASS, destacando que hay experiencia en Chile de su aplicación con excelentes resultados para apoyar el pronóstico de condiciones de ventilación en Santiago[25].

Considerando que la limitante de incorporar el equipo LAP-RASS puede ser su alta inversión inicial del orden de USD 600.000, se sugiere como alternativa inicial y más económica la instalación de una estación meteorológica en la cima de un cerro cercano a una altura cercana a 1000 m.s.n.m. Aunque esta alternativa no permite determinar la ubicación de la base de la capa de mezcla, hay experiencia de buenos resultados para ampliar o mejorar el cálculo de un índice de estabilidad en apoyo al sistema operacional de pronóstico en Santiago y Temuco[26].

Otra opción más económica, respecto a un LAP-RASS es instalar un nefobasímetro, pero este equipo no entrega perfiles verticales de temperatura haciendo una estimación indirecta de la capa de mezcla siendo su principal limitante problemas al realizar mediciones bajo condiciones de niebla y nubosidad baja, condición muy frecuente en la zona en estudio, lo cual impediría tener continuidad en la información que se obtenga.

Dada la importancia por la aplicación que se dará a la data que se obtenga para fines de pronóstico y para garantizar la calidad de ella, cualquier alternativa que se implemente debe estar sometida a un riguroso programa de mantención, calibración y aseguramiento de calidad.

3.4 Cámaras de Vigilancia

El uso de cámaras de vigilancia permitiría visualizar el desplazamiento y comportamiento del penacho o pluma, desde el Complejo Industrial hacia Quintero en la noche o madrugada, y durante el día hacia las estaciones ubicadas en la Comuna de Puchuncaví. Para la detección, seguimiento y análisis de esta pluma, se podría utilizar una cámara de video que utilice infrarrojo durante la noche y que durante el día se pueda obtener una imagen visual.

Existen en el mercado internacional algunas cámaras del tipo infrarrojo, que se utilizan especialmente para la detección de emisiones fugitivas, principalmente en la industria de la energía. Estos aparatos se denominan cámaras de visualización óptica de imágenes de gas (OGI) y tienen la particularidad de detectar distintos tipos de gases invisibles al ojo humano, pero que dependiendo de las especificaciones técnicas de cada una de ellas, hacen esto posible. Sin

[25]Pronóstico diario de condiciones meteorológicas asociadas a episodios de contaminación atmosférica (PM 10) en Santiago. Periodo Marzo-septiembre. Proyecto desarrollado por CENMA para CONAMA RM años 1997 a 2003.
[26]Estación instalada por CENMA para el pronóstico de episodios por material particulado MP10 y MP2,5 en Temuco

embargo, existe la posibilidad de darle una aplicación distinta respecto de su uso más común, como el monitoreo (desplazamiento) de un penacho.

Se sugiere considerar la utilización de este tipo de cámaras de visualización óptica de imágenes de gas (OGI), u otra que se pueda aplicar, para la vigilancia de los gases que se desplazan en la zona, ubicándolas en lugares estratégicos.

A continuación, en la Figura 3-10 se presenta una imagen con un tipo de cámara de vigilancia factible de implementar y sus especificaciones técnicas.

Figura 3-10 Ejemplo de cámara de vigilancia

Caroline fixed series integrates the latest technology in uncooled infrared detectors, offering consistent and error-free performance. The most complete system for constant monitoring of environments with risks of methane, SO2, VOC's, Natural Gas and/or hydrocarbons.

Specifications	
FPA	640 x 480 px
Pixel Pitch	17 µm
NETD	<22mK @ +30°C
Optical	Interchangable lenses N: 12°x9° | M: 18°x13° | W: 31°x23°
Accuracy	+/- 1°C (from -10°C to 60°C)
Data	Gige
Power Model FY Model FY_PT	 <3 watts; PoE (power over ethernet) 9v-48v <5 watts; 12Vin Connector Samtec ACR-12-03
Weight	<3 kg
Size	97x110x330 mm
Operating Temp. Range	-10°C to +65°C
Storage	-40°C to +71°C
Certifications	EMC (EN 61326:2013) IP 65 (EN 60529:2018) ATEX II 3 G Ex nA IIC T6 (EN 60079:2013)
Features under demand	
Scanning	Pan & Tilt
Atex	II 2 G Ex db op pr II C T6 Gb
Relay	Hot relay contact on site
Auxiliar Power Supply	12 VDC (instead of PoE)
Communication	Wireless Supported
SMART Model	Request for more information

MAIN FEATURES

RedLook Software
Single control software integrated in the processing unit with several functionalities.

Continuous Monitoring
When unattended, automatically alert of any danger and recover event video from alarms log.

Pan & Tilt Mounting
The TOUR option can be activated, allowing surveillance of multiple areas. For each of these areas, one or several functionalities can be configured.

Communications
Ethernet and optical fiber connections

Rugged System
Equipment designed for use in harsh environments, ATEX ZONE II compliant

Alarm reporting
Metadata linked to survey for easy leaks tracking

Interchangable lenses
Different FoV configurations under demand. Motor focus available

ATEX Certification
Certificated for safe use in explosive atmospheres.

Fuente: Catálogo del fabricante

Se recomienda instalar estas cámaras en los recintos donde están las estaciones Loncura y Torre meteorológica principal, con ubicaciones ilustradas en la Figura 3-11.

Figura 3-11 Propuesta de ubicación para cámaras de Vigilancia en Quintero

Fuente: Elaboración propia usando Google Earth

Costos asociados

Dado que no se encontró proveedor local para este tipo de cámaras, se obtuvo cotización de un proveedor en España, por un valor unitario de USD 420.000, por lo que las dos unidades que se proponen tendrían un costo de USD 840.000. Dado el alto valor del equipo, sería importante abordar su implementación logrando que algunos de los proveedores realicen previamente pruebas locales que permitan evaluar su desempeño.

4 Producto iii de BT: Caracterización de la estructura vertical de la atmósfera con identificación de la estabilidad superficial y regional, y su efecto en el ciclo diario y/o estacional del transporte de contaminantes.

Para caracterizar la estructura vertical de la atmósfera en la zona de estudio, e identificar la estabilidad regional y superficial se utilizó la información proporcionada por el radiosonda de Santo Domingo, la Torre Meteorológica Principal, la clasificación de condiciones sinópticas y de mesoescala desarrollada por el equipo consultor, y las concentraciones de SO_2 entregadas por la contraparte técnica.

Este capítulo aborda los conceptos generales relacionados con la estructura vertical de la atmósfera, presenta la información disponible para su caracterización, y luego se analiza para identificar su efecto en las concentraciones de contaminantes en la zona de estudio.

4.1 Conceptos Generales

Se describen los conceptos relevantes de este capítulo, las escalas en que se desarrollan los fenómenos meteorológicos, la estabilidad atmosférica a escala regional y a escala local.

4.1.1 Escalas de los fenómenos meteorológicos

La Tabla 4-1 muestra las distintas escalas temporales y espaciales asociadas a diferentes configuraciones o fenómenos meteorológicos. Se observa una relación directa entre la extensión espacial y temporal de cada escala.

Tabla 4-1Escalas temporales y espaciales de fenómenos meteorológicos[27]

Escalas	Extensión espacial	Extensión temporal	Ejemplos de fenómenos asociados
Global	Planetaria	Semanas a meses	ENOS, Jet-Stream, celda de Hadley
Sinóptica	100-1000 km	Días	Sistemas frontales, Altas presiones cálidas o semipermanentes
Subsinóptica Mesoescala	10 -100 km	Horas a días	Brisas Tierra-Mar y Mar-Tierra Vaguadas costeras, Núcleos Fríos
Escala local	1 a 10 km	Minutos a horas	Inversiones térmicas radiativas
Microescala	Metros	Segundos	Turbulencia, ondas Kelvin-Helmholtz

Fuente: Elaboración propia considerando estudio Giménez R.X.

A fin de caracterizar el factor meteorológico y categorizar las condiciones de ventilación en este estudio, se consideró la escala local para analizar las variables meteorológicas de la red de estaciones y la inversión térmica radiativa; la mesoescala para análisis de brisas, inversiones térmicas regionales, vaguadas costeras y núcleos fríos; y sinóptica para las configuraciones de sistemas frontales y altas presiones cálidas.

[27]Giménez R.X.; Estudio de la relación entre la situación meteorológica a escala sinóptica y la contaminación a escala regional. Aplicación al ozono troposférico en Catalunya.

4.1.2 Estabilidad a escala regional

Lo que define la estabilidad atmosférica es el *gradiente vertical de temperatura* (GTV) que representa la variación de la temperatura con la altura. Normalmente la temperatura disminuye con la altura y el GTV para el aire seco corresponde a - 9,8°C/km y para el aire húmedo - 6,5°C/km.

La estabilidad a escala regional se asocia principalmente a la presencia de inversiones térmicas de subsidencia, es decir, originadas por el descenso a gran escala de masas de aire y el consecuente calentamiento del aire por compresión adiabática[28], cuyo efecto es que el aire que se encuentra bajo la inversión no pueda ascender sobre ese nivel, deteriorándose de este modo las condiciones de ventilación.

Se usa el término inversión térmica porque en la troposfera la temperatura normalmente disminuye con la altura. La condición de estabilidad neutra o inestabilidad de una parcela de aire dependerá de su contenido de humedad y su comparación con el GTV de las adiabáticas seca y húmeda.

- Si en una capa atmosférica la temperatura aumenta con la altura, GTV>0, se presenta una inversión térmica y condiciones de estabilidad.
- Si el GTV=0 la estabilidad sería neutra.
- Si el GTV< 0 habría condiciones de inestabilidad[29]

En esta comparación cuando GTV≤0 respecto a la estabilidad es válida cuando se considera la temperatura potencial (ø)[30] de una parcela de aire.

Ahora bien, el clima frente a la costa del norte y central de Chile está controlado por la presencia del anticiclón subtropical del Pacífico sur-oriental, que produce condiciones muy estables en la troposfera baja, debido a la inversión térmica de subsidencia, vientos predominantes de componente sur y una extensa cubierta de nubosidad baja, estratos (ST) y estratocúmulos (SC)[31].

La altura media de la base de la inversión térmica de subsidencia, considerado el periodo 1958-1985 y medida en la estación de Radiosonda de Quintero a las 00 y 12 UTC[32], es de 382 y 332 m.s.n.m. respectivamente, en tanto el tope se sitúa a 1002 a las 00 UTC y a 968 m.s.n.m. a las 12UTC[33].

Superpuestas a estas condiciones medias existen fluctuaciones del espesor de la capa límite marina o *capa de mezcla* (se define en punto siguiente de estabilidad local), cobertura de la nubosidad baja (ST y SC), intensidad y dirección del viento; y presión atmosférica entre otras

[28]Adiabático: Procesos atmosféricos que se llevan a cabo sin intercambio de calor con el entorno
[29]Djuric; Weather Analysis,:1994
[30] La temperatura potencial (ø) de una parcela de aire, corresponde a la temperatura que tendría la parcela si fuese expandida o comprimida adiabáticamente desde su estado inicial de presión y temperatura una presión estándar (generalmente 1000 hPa).
[31]Garreaud R., Rutllant J.,:2006, Variabilidad atmosférica de alta frecuencia en el borde oriental del Pacífico sureste.
[32]UTC: United Time Coordinated. En Chile en verano H.L. (hora local) = UTC-3 en tanto en invierno es UTC-4
[33]Rutllant J.:1994 On the generation of coastal lows in Central Chile.

variables. Entre los mecanismos causantes de esta variabilidad está el ciclo diario de insolación[34], perturbaciones atmosféricas atrapadas a la costa[35], sistemas frontales y bajas segregadas o núcleos fríos en altura.

Particular interés tiene en este estudio las condiciones atmosféricas atrapadas a la costa de escala subsinóptica (mesoescala o regional), conocidas como bajas o *vaguadas costeras*, debido al significativo impacto que tienen en las condiciones de estabilidad a niveles bajos y altura de la capa de mezcla o capa límite marina. Esta configuración que ya fue identificada al principio de los 70´s[36], intensifica la inversión de subsidencia y hace descender su base frecuentemente hasta la superficie, reduciendo significativamente el crecimiento diurno de la capa de mezcla superficial.

4.1.3 Estabilidad a escala local

La estabilidad representa que tan desfavorable está la columna atmosférica para permitir el desarrollo de convección. Como se mencionó, uno de los parámetros meteorológicos relevantes para determinar la estabilidad es el GTV, y a escala local, se analiza considerando la inversión térmica radiativa. El espesor típico de una inversión térmica radiativa es del orden de 150 metros, pero puede variar entre 50 y 300 m s.n.s. [37]

Íntimamente relacionado con la inversión térmica está la capa de mezcla (CM), que representa el volumen de aire disponible para la dispersión y transporte de los contaminantes, un estrato de aire sujeto a la influencia de la superficie terrestre. Su altura es variable y normalmente está delimitada por una inversión térmica.

En la CM se produce turbulencia mecánica debido a la rugosidad y calentamiento diurno del suelo y el transporte y difusión de contaminantes. El espesor de la capa de mezcla puede ser prácticamente nulo en presencia de inversiones térmicas radiativas por enfriamiento nocturno o inversiones de subsidencia que alcanzan la superficie. En otras ocasiones puede alcanzar alturas decenas o centenas de metros, e incluso desaparecer, por ejemplo, con el paso de sistemas frontales.

La altura de la CM tiene gran importancia por su impacto en la calidad del aire. Considerando para efecto de análisis las emisiones constantes, las concentraciones de contaminantes aumentarán si la CM es somera y el viento superficial débil, como contrapartida, si aumenta la altura de la CM y el viento, las concentraciones de contaminantes disminuyen.

Con el calentamiento diurno, se incrementa la turbulencia mecánica y térmica dentro de la CM, la que se propaga hacia niveles más altos, aumentando su altura. Las inversiones superficiales como las radiativas típicamente desaparecen al comenzar el calentamiento diurno, en tanto hacia el final

[34]Rutllant J.,et al.,:2002_Garreaud R., Muñoz R.,: 2004
[35]Garreaud et al.,:2002
[36]Rutllant J., 1973, Factores Meteorológicos en la contaminación atmosférica de Santiago.
[37]Nuñez C., 2002, Altura de la capa de mezcla: Caracterización experimental y aplicación de un modelo meteorológico para el estudio de su evolución diurna. Memoria para optar al título de doctor.

del día y primeras horas de noche, se observa normalmente un descenso abrupto de la altura de la CM, al desaparecer los mecanismos que habían permitido su ascenso.

La estabilidad a escala local es de suma importancia en este estudio, pues modula las condiciones de ventilación cerca de la superficie. Se tiene únicamente un parámetro para estudiar la inversión térmica superficial (sólo hasta su último nivel, 40 m), la diferencia de temperatura (dT) entre 40 y 10 m. s.n.s medida en la Torre meteorológica Principal. Este dT en la Torre, es un indicador que muestra si se ha formado una inversión térmica de radiación por enfriamiento nocturno (aunque no entrega información respecto al espesor de la inversión o si ésta pudiera estar acoplada con una inversión de subsidencia).

Tanto el concepto de estabilidad regional como local, ha sido incorporado en el comentario de las figuras, como así mismo el concepto de capa de mezcla, mezcla turbulenta[38] [39].

4.2 Datos y métodos

4.2.1 Radiosonda de Santo Domingo

A fin de caracterizar la estabilidad a escala regional se utilizó el Radiosonda[40] de Santo Domingo (-33.65; -71.61), ubicado en la zona geográfica del litoral, a 3 km de Santo Domingo costero, a 75 m. s.n.m.[41].

La ubicación del sector de lanzamiento de la sonda en Santo Domingo está a una distancia de 80 km en línea recta hasta Concón. De acuerdo al criterio general para este tipo de mediciones, estaría dentro del radio de 200 km de representatividad, sin embargo, se debe considerar la diferencia por topografía. Lo óptimo sería contar con mediciones continuas de perfiles verticales en la zona de estudio.

[38] Estudio consultado: Stull, R. B. (2012). An introduction to boundary layer meteorology (Vol. 13). Springer Science & Business Media.

[39] Estudios consultados: Muñoz, R. C., & Undurraga, A. A. (2010). Daytime mixed layer over the Santiago Basin: Description of two years of observations with a lidar ceilometer. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *49*(8), 1728-1741.

Muñoz Magnino, R. & Alcafuz, R. I. (2012). Variability of urban aerosols over Santiago, Chile: Comparison of surface PM10 concentrations and remote sensing with ceilometer and lidar.

[40]Instrumento que mide en la vertical variables meteorológicas (presión, temperatura, humedad, viento), y envía a una estación en superficie los datos obtenidos durante su ascenso a través de la atmósfera. (Definición Capítulo "Medición de la presión, la temperatura y la humedad en altura" https://library.wmo.int/ librería OMM).

[41]Información general de Radiosonda Santo Domingo: Código OMM 85586; Código OACI SCSN; Propietario Dirección Meteorológica de Chile; Fecha inicio mediciones 01-08-1966.
(Fuente https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/informacion/ficha-de-estacion/330030)

Figura 4-1 Ubicación del Radiosonda de Santo Domingo y estaciones de monitoreo en la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia en Google Earth

4.2.1.1 Descripción información que proporciona el Radiosonda

El radiosonda proporciona información de distintos parámetros meteorológicos en la componente vertical de la atmósfera y normalmente se realiza una o dos veces al día (a las 00 y 12 UTC) [42]. Para cada nivel de Presión (hPa) altitud (mgp), temperatura (°C), temperatura del punto de rocío (°C), humedad relativa (%), razón de mezcla (g/kg), dirección (grados) y magnitud del viento (nudos), temperatura potencial (°K), temperatura potencial equivalente (°K) y temperatura potencial virtual (°K). Además, se agrega información de diversos índices, entre otros: Índices de estabilidad, Energía convectiva potencial disponible (J/kg), Nivel de convección libre (hPa), Espesor 1000-500 (mgp) y Agua precipitable (mm).

La información se despliega en diagramas termodinámicos, donde a través del análisis se puede determinar, entre otros: capas con estabilidad neutra, estable o inestable; base y tope de inversiones térmicas, altitud e intensidad de la corriente en chorro, espesor de capas nubosas y nivel de la tropopausa.

4.2.1.2 Información utilizada y justificación

Datos radiosonda: Para el análisis de la estructura vertical y estabilidad, se considera el período 2016-2019 a las 12UTC para los niveles mandatorios de superficie 1000 hPa, 850 hPa, 700 hPa y 500 hPa, calculándose además la base y el tope de la inversión térmica.

[42]UTC: Universal Time Coordinated. En Chile en verano H.L. =UTC-3 y en invierno UTC-4

Justificación del uso del período 2016- 2019: Como las configuraciones sinópticas de altura constituyen típicamente el elemento forzante de las condiciones de escala regional y local, es importante que el periodo de análisis de los datos de superficie y altura sea el mismo. Para los datos de estaciones de superficie, existe una mayor disponibilidad de la información de las estaciones de monitoreo (completitud en los datos) desde el año 2016[43]. Además, es razonable considerar 4 años, ya que los patrones meteorológicos en superficie y altura no tienen una variación interanual importante[44].

Justificación uso de datos del lanzamiento de las 12 UTC: Se selecciona a fin de caracterizar las condiciones de estabilidad a primeras horas del día, más cercano a las horas en que se producen los episodios en Quintero, que es la estación que muestra un mayor número de episodios en el periodo de estudio.

Justificación selección de niveles en la vertical del radiosondeo (1000, 850, 700 y 500 hPa): Se fundamenta en que el nivel de 1000 hPa es representativo del nivel de superficie, 850 hPa de la baja troposfera, 700 hPa como nivel intermedio (entre 850 y 500 hPa) y 500 hPa representa el nivel de la troposfera media. Se incluyeron también los niveles de la base y el tope de la inversión térmica, por su relevancia en determinar las condiciones de estabilidad a escala regional.

4.2.1.3 Metodología

De los lanzamientos de radiosonda en Santo Domingo (-33.65; -71.61) de las 12 UTC, entre el 01 de enero de 2016 y el 31 de diciembre de 2019, se obtuvieron los datos en la vertical de temperatura del aire (°C), temperatura del punto de rocío (°C), altura geopotencial (mgp), además de dirección (grados) y magnitud del viento (nudos). Esta información fue entregada por la contraparte técnica con información obtenida de la Universidad de Wyoming[45].

Se trabajó con los datos correspondientes a las 12 UTC (09:00 am hora local. en horario de verano y 08:00 am en horario de invierno) con tal de caracterizar las condiciones de estabilidad en las primeras horas de la mañana. El porcentaje de datos disponible es de un 89% distribuido de la siguiente manera: año 2016 un 97%, año 2017 un 93%, año 2018 un 76% y año 2019 un 91%.

Con el objetivo de homogeneizar la resolución vertical (dado que cada lanzamiento posee distintos niveles verticales reportados, a excepción de los niveles mandatorios), se realizó también una interpolación desde los 1000 hasta los 50 hPa, cada 25 hPa. De esta manera, todos los perfiles tendrán la misma resolución vertical (25 hPa). Los datos de dirección y velocidad del viento fueron transformados previamente a viento zonal (u, en m/s) y viento meridional (v, en m/s).

[43]Estaciones de monitoreo de Loncura y Puchuncaví con información completa de MP2,5 desde el año 2016. En el caso de Quintero, la nueva estación comenzó a medir a fines del 2015.
[44]Una de las conclusiones del Informe de Avance 1 de este estudio fue la consistencia temporal interanual de las variables meteorológicas de superficie, al comparar datos para un periodo de 10 años.
[45]http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html

Con los datos ya interpolados, se calcularon los perfiles promedio (desde 1000 hasta 50 hPa cada 25 hPa) para cada configuración sinóptica. Los perfiles promedio se presentan en gráficos con el eje vertical expresado en logaritmo de la presión entre 1000 y 450 hPa para ver en detalle el comportamiento de las variables en los niveles bajos (por debajo de los 800 hPa) de la troposfera.

4.2.1.3.1 La Metodología para obtener la altura y temperatura de la base y tope de la inversión

Utilizando el software Matlab se confeccionó la base de datos con los niveles mandatorios e intermedios, y se determinó la Base de inversión térmica (BINV) y el Tope (TINV), en trabajo conjunto con la contraparte técnica.

Resumidamente para BINV se definió la condición de que la Temperatura (i) fuera menor a la Temperatura siguiente (i+1).

Para TINV se definieron las siguientes condiciones: Que la temperatura (i) fuera mayor que (i+1) (i+2) (i+3) (i+4) (los 4 niveles siguientes), que la diferencia de Humedad Relativa entre la Base y el Tope fuera mayor a 20%, y que la Temperatura de BINV >= 1[46]

Una vez determinados los niveles de base y tope de la inversión térmica, se calculó la diferencia de temperatura entre estos niveles a las 12 UTC para obtener información sobre la estabilidad en la capa límite marina durante el periodo matutino.

4.2.2 Torre meteorológica Principal

A fin de caracterizar la estructura vertical a nivel local, se analiza la información de la torre meteorológica Principal ubicada a 32°45’57’’ latitud Sur con 71°29’02’’ longitud Oeste, emplazada en el Complejo Industrial Ventanas Comuna de Puchuncaví.

Las Figuras siguientes muestran la ubicación y una vista general de la Torre meteorológica.

[46]Tanto la base de datos de los niveles mandatorios e intermedios utilizados en una parte del estudio, como el cálculo de la base y tope de la inversión térmica, fue desarrollado y proporcionado por la contraparte técnica de este estudio

Figura 4-2 Ubicación estaciones de monitoreo en la zona de estudio incluyendo la Torre meteorológica Principal

Fuente: Elaboración propia en Google Earth

Figura 4-3 Vista general de la Torre Meteorológica Principal

Fuente: Imagen Internet correspondiente a la Torre meteorológica Principal

4.2.2.1 *Información proporcionada por la Torre meteorológica*

Esta torre entrega información de utilidad para estudiar la estabilidad local en la vertical, hasta los 40m de altura[47], y mide VV, DV, T, HR, RS y PA[48].

Donde: VV= Magnitud de Viento, DV= Dirección de Viento, T= Temperatura, HR= Humedad Relativa, RS= Radiación Solar y PA= Presión Atmosférica.

4.2.2.2 *Información utilizada*

Se utilizaron los datos horarios de la Torre entre 2016 y 2019, principalmente la temperatura a 10 y 40 metros, a fin de obtener un gradiente vertical.

4.2.2.3 *Metodología para el cálculo de la diferencia de temperatura (dT en la Torre)*

Con los datos horarios entre 2016 y 2019, se calculó la diferencia de temperatura entre 40 y 10 metros con la finalidad de estimar el gradiente vertical de temperatura que permita inferir el grado de estabilidad atmosférica entre estos niveles. Se utilizó el dato de diferencia de temperatura de las 08:00 am como representativo del período matutino para complementar la información obtenida desde los sondeos de Santo Domingo (a las 12UTC), de tal manera de tener una visión más completa de la estabilidad en el periodo matutino.

Se agruparon los datos de diferencia de temperatura matutina según configuración sinóptica y se presentó la información en diagramas de cajas.

4.2.2.4 *Diagramas de cajas (boxplot)*

Se agruparon los datos de altura de la base de la inversión térmica y la diferencia de temperatura entre base y tope según configuración sinóptica. El resultado de esta agrupación se presenta en diagramas de cajas (boxplot), en donde los extremos de cada caja corresponden a los percentiles 25 y 75 (rango intercuartil). La mediana (percentil 50) se presenta en una línea roja dentro de la cada caja y en los extremos inferiores y superiores de los valores (no considerando outliers), se grafican los bigotes[49].

Como el objetivo de esta sección es describir el comportamiento medio de las variables según cada configuración sinóptica, se dejaron fuera de las gráficas los valores outliers, para ganar resolución en la descripción de los valores observados en torno a la mediana.

---

[47]A excepción del periodo nocturno en que se presentan frecuentes inversiones térmicas radiativas, la altura de la capa de mezcla se encuentra típicamente sobre el nivel más alto que mide la torre (40m).

[48]En la Torre meteorológica principal la medición de VV, DV, T y HR se realiza a 3 niveles: 10m, 20 m y 40 m y la medición de RS y PA se realiza a 20m.

[49]Referencias utilizadas para la metodología de boxplot: Wilks, D. S. (2011). Statistical methods in the atmospheric sciences (Vol. 100). Academic press.

4.2.3 Otros datos utilizados

A fin de relacionar la estructura vertical con las configuraciones meteorológicas y el efecto en la contaminación, se generó una base de datos con las Configuraciones Meteorológicas Sinópticas diarias para el periodo 2016-2019, cuya descripción y metodología se encuentra desarrollada en el Capítulo "Clasificación de los fenómenos meteorológicos a distintas escalas su frecuencia de ocurrencia y su relación con el desarrollo de eventos de aumento de concentraciones de contaminantes atmosféricos".

Para relacionar el efecto de la estabilidad en los niveles de contaminación, se utilizaron los datos de las estaciones de monitoreo proporcionadas por el MMA, seleccionando 3 estaciones, Concón, Quintero y Los Maitenes.

La justificación del uso de estas estaciones se basa en que todas ellas constituyen la condición relevante de su respectiva Red de monitoreo en cuanto a calidad del aire, es decir, que éstas registran los valores más altos de SO_2 y MP2,5, representando de este modo a las 3 zonas que contemplan este estudio, Concón, Quintero y Puchuncaví.

4.3 Resultados para la estabilidad regional

4.3.1 Presentación de Configuraciones Sinópticas

Para estimar la estabilidad regional resulta relevante analizar las distintas configuraciones sinópticas, y por tanto es necesario abordar sucintamente la información levantada con este propósito. La tabla siguiente indica las configuraciones más recurrentes en la zona de estudio, agrupadas en el período frío y cálido para los años 2016 a 2019.

El análisis detallado de estas configuraciones se abordará en el Capítulo "Clasificación de los fenómenos meteorológicos a distintas escalas, su frecuencia de ocurrencia y su relación con el desarrollo de eventos de aumento de concentraciones de contaminantes atmosféricos".

La Tabla 4-2 indica el porcentaje de días con cada configuración sinóptica y de mesoescala, considerando el periodo cálido (octubre-marzo) y un periodo frío (abril-septiembre).

Tabla 4-2 Porcentaje de días para cada configuración sinóptica periodo frío y cálido, entre 2016 y 2019.

Configuración sinóptica	Porcentaje del total de días en periodo frío (%) (abril-sep2016-2019)	Porcentaje del total de días en periodo cálido (%) (octubre-marzo2016-2019)
Margen anticiclónico (MA)	29.5	56.4
Desarrollo de vaguada costera (VC1)	15.0	13.7
Culminación de vaguada costera (VC2)	6.8	5.0
Disipación de vaguada costera (VC3)	6.7	7.5

Configuración sinóptica	Porcentaje del total de días en periodo frío (%) (abril-sep2016-2019)	Porcentaje del total de días en periodo cálido (%) (octubre-marzo2016-2019)
Pre-frontal (PreF)	6.7	1.7
Sistema frontal (SF)	10.0	1.9
Post-frontal (PosF)	6.4	1.9
Frente en altura (FA)	10.1	6.3
Núcleo frío en altura (NF)	2.0	3.9
Alta presión fría (AF)	6.7	1.5

Fuente: Elaboración propia. Se identificó diariamente la configuración sinóptica (condición relevante del día) presente en la zona de estudio para el periodo 2016 a 2019.

Una primera característica que se observa de la Tabla 4-2 es que la frecuencia de ocurrencia de las configuraciones es distinta al comparar el periodo cálido con el frío. Si bien en ambos periodos domina la presencia del margen anticiclónico, éstos son más frecuentes durante la temporada cálida, periodo en el cual se reducen dramáticamente las configuraciones asociadas con ciclones extratropicales, tales como el prefrontal, sistema frontal, post-frontal y alta presión fría. Esto se debe principalmente al hecho de que durante el invierno todo el sistema climático se desplaza hacia el ecuador, permitiendo el paso de sistemas frontales por la zona central de Chile. Situación opuesta ocurre durante el verano.

El porcentaje de vaguadas costeras, en todas sus fases, se mantiene similar entre temporadas.

4.3.2 Características perfiles verticales medios

Utilizando los datos de los radiosondeos de Santo Domingo, se calcularon los perfiles medios de temperatura, temperatura del punto de rocío, viento zonal y meridional según cada configuración sinóptica presente durante el día del lanzamiento.

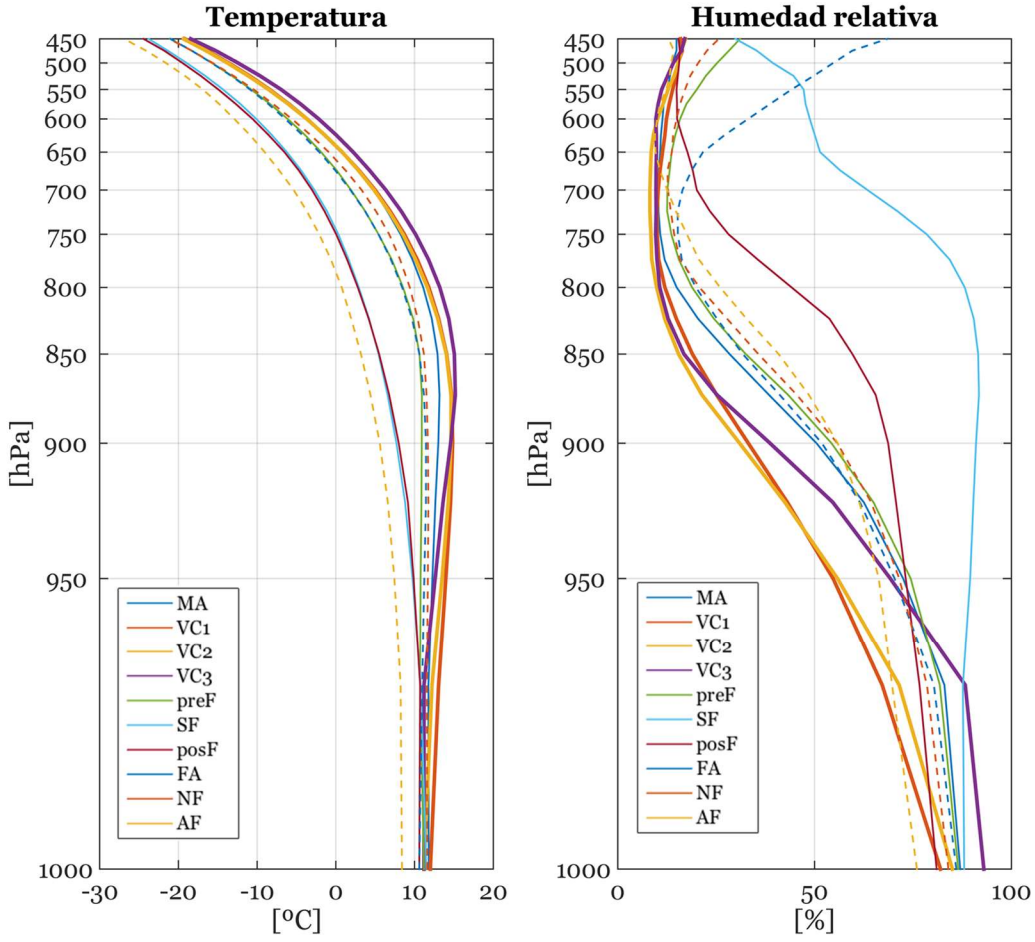
La Figura 4-4 muestra los perfiles medios de temperatura y humedad relativa y la Figura 4-5 los perfiles medios del viento zonal y meridional. Se puede observar que en superficie los valores de temperatura son similares en todas las configuraciones, ligeramente superior a 10ºC y a medida que se asciende en el perfil, las diferencias de temperatura comienzan a ser mayores entre las configuraciones.

En la capa límite marina, generalmente ubicada bajo los 950 hPa y caracterizada por humedad relativa aproximadamente constante, las configuraciones que asocian las mayores temperaturas son el desarrollo de vaguada costera (VC1) y culminación de vaguada costera (VC2), que son configuraciones que en niveles bajos asocian advección de aire cálido, viento del este (Figura 4-5) y baja humedad relativa, mientras que las configuraciones más frías en superficie son la alta

presión fría (AF), sistema frontal (SF) y post-frontal (PosF) que asocian advecciones de aire frío o enfriamiento local por precipitación o reducción en la radiación incidente producto de cielos cubiertos. La disipación de vaguada costera (VC3) en superficie es fría (menor al promedio) principalmente debido a la alta humedad relativa, dado que la etapa VC3 asocia generalmente la entrada de nubosidad baja tipo estratos y estratocúmulos.

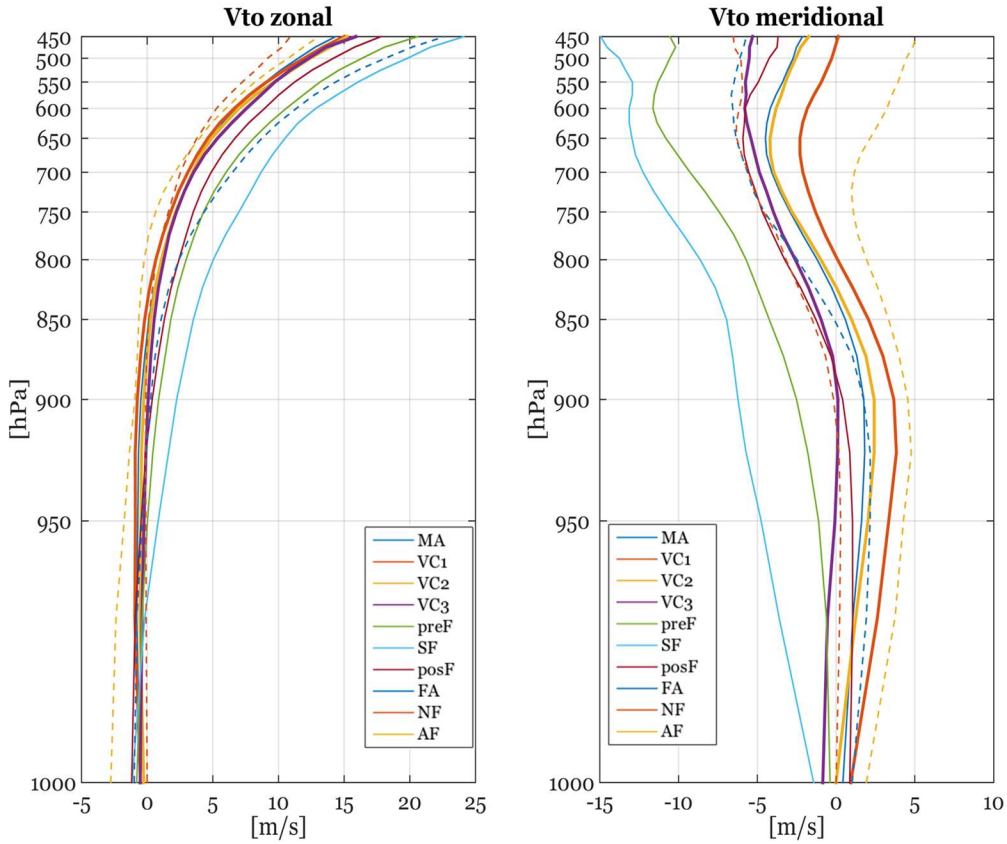
El viento en las capas bajas de la troposfera presenta una mayor variabilidad en la dirección norte-sur (viento meridional).

Figura 4-4 Perfil de temperatura y humedad relativa media en Santo Domingo para cada configuración sinóptica.



Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Radiosonda Santo Domingo

Figura 4-5 Perfil de viento zonal y meridional medio en Santo Domingo para cada configuración sinóptica.



Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Radiosonda Santo Domingo. Valores positivos (negativos) del viento zonal significan vientos del oeste (este) y valores positivos (negativos) del viento meridional significan vientos del sur (norte).

En alrededor de los primeros 1500 m, desde superficie hasta 850 hPa, es donde se presentan las inversiones térmicas de subsidencia y radiativas. Los perfiles medios, en la Figura 4-4, no muestran grandes variaciones de temperatura en esta capa inferior, lo que puede estar relacionado con el hecho de que corresponde a un promedio de todos los días bajo cierta configuración sinóptica, lo que suaviza los resultados.

4.3.3 Comportamiento inversión térmica

Para estudiar con mayor detalle la capa de mezcla, en la Figura 4-6 se presentan los resultados de altura y diferencia de temperatura para las inversiones térmicas obtenidas con los radiosondeos.

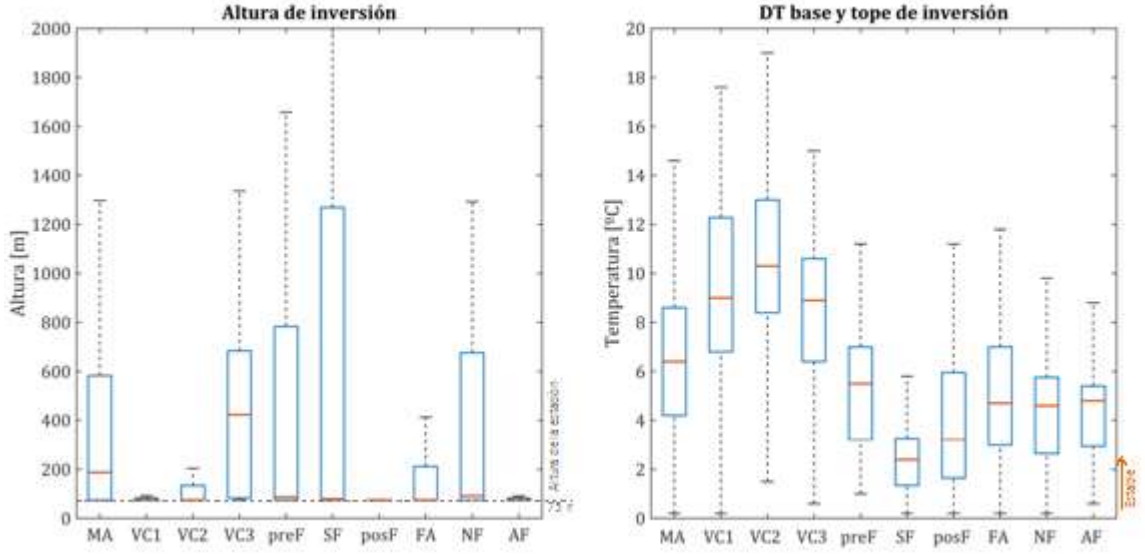
Los gráficos de cajas en la Figura 4-6 permiten observar la dispersión de la altura y diferencia de temperatura en las inversiones térmicas analizadas con información del radiosonda de Santo

Domingo. El gráfico, como se mencionó anteriormente, muestra la tendencia central a través de la mediana (en color rojo) y la dispersión a través del rango intercuartil (cajas de color azul).

Con respecto a las alturas de la inversión, mientras más baja se encuentra la altura de la base de la inversión menor será la altura de la capa de mezcla y los contaminantes tendrán un menor volumen para mezclarse, mientras que la diferencia de temperatura entre base y tope entrega información sobre la estabilidad. A mayor diferencia de temperatura, mayor será la estabilidad.

En la Figura 4-6 se puede observar que la mediana se presenta por debajo de los 200 m para todas las configuraciones, con excepción de la disipación de vaguada costera. Esto se puede deber al hecho de que el enfriamiento matutino provoca una inversión térmica radiativa muy somera, lo que se refleja en alturas de inversión cercanas a la superficie (75 m s.n.m.) correspondientes a la altura del lugar de lanzamiento en Santo Domingo). Por sobre esta altura de inversión radiativa se puede encontrar de manera acoplada una inversión térmica de subsidencia, pero debido al método de determinación de la altura de la base, sólo la inversión de menor altura queda registrada. A pesar de esta limitante del análisis, es posible identificar importantes diferencias entre las configuraciones sinópticas a juzgar por el rango intercuartil de las alturas de base de la inversión.

Figura 4-6 Altura de la base y diferencia de temperatura entre base y tope para las inversiones térmicas durante la mañana en Santo Domingo para cada configuración sinóptica.



Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Radiosonda Santo Domingo

Las configuraciones que presentan las menores alturas son el desarrollo y culminación de la vaguada costera, post-frontal y alta presión fría, mientras que las configuraciones que muestran las mayores alturas en la base de la inversión térmica son la disipación de vaguada costera, prefrontal, sistema frontal, núcleo frío y margen anticiclónico.

Del análisis de diferencias de temperatura se desprende que la mayor estabilidad se presenta bajo la presencia de culminación y desarrollo de vaguada costera, siendo esta configuración la que

presenta los mayores niveles de estabilidad, vientos débiles y sequedad en la capa superficial (Figura 4-4). La disipación de vaguada costera es una configuración que muestra gran nivel de estabilidad, sin embargo, las inversiones con esta fase de la vaguada costera presentan una mayor altura, además de una mayor humedad (Figura 4-4). Esto indica que tanto el desarrollo, como la culminación de la vaguada costera, son configuraciones sinópticas que asocian bajas alturas de la capa de mezcla, vientos débiles, sequedad, estabilidad en la capa superficial y consecuentemente malas condiciones de ventilación.

La alta presión fría es la configuración sinóptica que presenta las menores temperaturas en superficie y una sequedad comparable con el desarrollo de la vaguada costera (Figura 4-4), además presenta diferencias de temperatura entre base y tope asociados a estabilidad, sin embargo, la magnitud del viento es mayor que lo observado para el caso de la vaguada costera (Figura 4-5). El desarrollo de intensas inversiones radiativas, debidas al rápido descenso de temperatura en días con esta configuración, pueden disminuir la altura de la capa de mezcla, reduciendo las condiciones de ventilación.

Por otra parte, las bajas alturas de la base de inversión observadas para el caso del post-frontal se pueden deber al hecho de rápidos descensos de temperatura que generan inversiones radiativas, sin embargo, las diferencias de temperatura entre base y tope muestran que es común presentar una condición inestable bajo condiciones postfrontales.

Conclusiones: Estos resultados muestran que, para todas las configuraciones, la mediana de la altura de la base de la inversión térmica se sitúa por debajo de los 200 m s.n.m. y mayoritariamente cercanas al nivel de superficie desde donde se lanza el radiosonda 75 m s.n.m. Esto se debería a la alta frecuencia con que se presentan inversiones térmicas radiativa por enfriamiento nocturno, en algunos casos acopladas a una inversión térmica de subsidencia. De acuerdo con el rango intercuartil de las alturas de la base de la inversión, es posible identificar que las configuraciones que presentan las menores alturas son: el desarrollo y culminación de la vaguada costera, post-frontal y alta presión fría; mientras que las que muestran las mayores alturas son la disipación de vaguada costera, prefrontal, sistema frontal, núcleo frío y margen anticiclónico.

Respecto a las diferencias de temperatura entre el tope y la base de la inversión, al análisis de temperatura, humedad relativa y viento en la vertical, es posible inferir que el desarrollo y culminación de vaguada costera, son configuraciones de mesoescala que asocian bajas alturas de la capa de mezcla, vientos débiles, estabilidad en la capa superficial y consecuentemente malas condiciones de dispersión de contaminantes.

La alta fría y determinadas condiciones postfrontales favorecerían el rápido descenso de la temperatura en el periodo nocturno y la formación de inversiones radiativas, que reducirían drásticamente la altura de la capa de mezcla y consecuentemente la capacidad de difusión de los contaminantes.

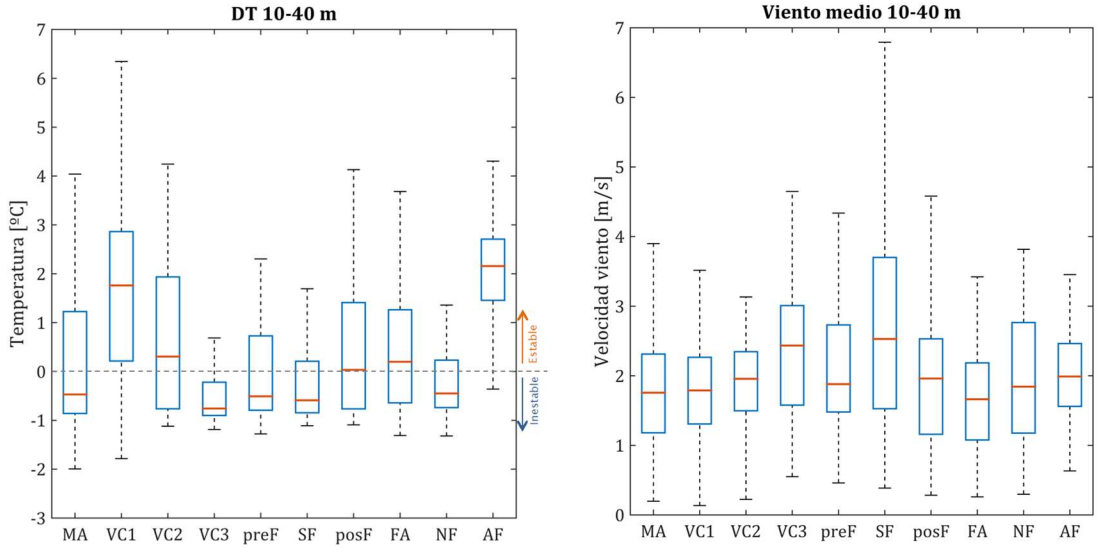
4.4 Resultados para la estabilidad superficial

4.4.1 Condición de estabilidad local

Es necesario señalar que respecto a las inversiones térmicas radiativas debido a enfriamiento nocturno, éstas se presentan asociadas a cielos despejados o escasa nubosidad y son más frecuentes e intensas en otoño-invierno. El sondeo de Santo Domingo muestra que alcanza un espesor entre 100 a 300 m s.n.s. Considerando los episodios en Quintero, se observó que en alrededor del 90% de los casos[50] se registraron inversiones térmicas radiativas y brisa tierra-mar, bajo diferentes configuraciones sinópticas y de mesoescala.

Para determinar las condición de estabilidad y viento superficial en una capa aún más cercana a la superficie se analizan las diferencias entre 10 y 40 m en la torre meteorológica Principal y el viento medio en esa capa, tal como se muestra en la Figura 4-7.

Figura 4-7 Diferencia de temperatura y viento medio entre 10 y 40 metros en la torre meteorológica Principal para cada configuración sinóptica.



Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Torre meteorológica Principal

Los datos de la torre meteorológica ratifican lo observado con los radiosondeos. Las configuraciones que presentan las mayores diferencias positivas entre 10 y 40 m son el desarrollo de la vaguada costera, la alta presión fría y la culminación de la vaguada costera. También se observan altos valores de estabilidad (>3°C de diferencia) con margen anticiclónico, post-frontal y

[50] Ver tabla resumen de episodios en Anexos

frente en altura. La velocidad media en esta capa cercana a la superficie muestra que salvo en la disipación de la vaguada costera y los sistemas frontales, los valores medios de velocidad son similares para todas las configuraciones, no obstante, la dispersión de los datos indica que los frentes en altura, desarrollo y culminación de vaguada costera presentan los vientos más débiles.

4.4.2 Concentraciones de SO_2 y días con inversión térmica radiativa nocturna

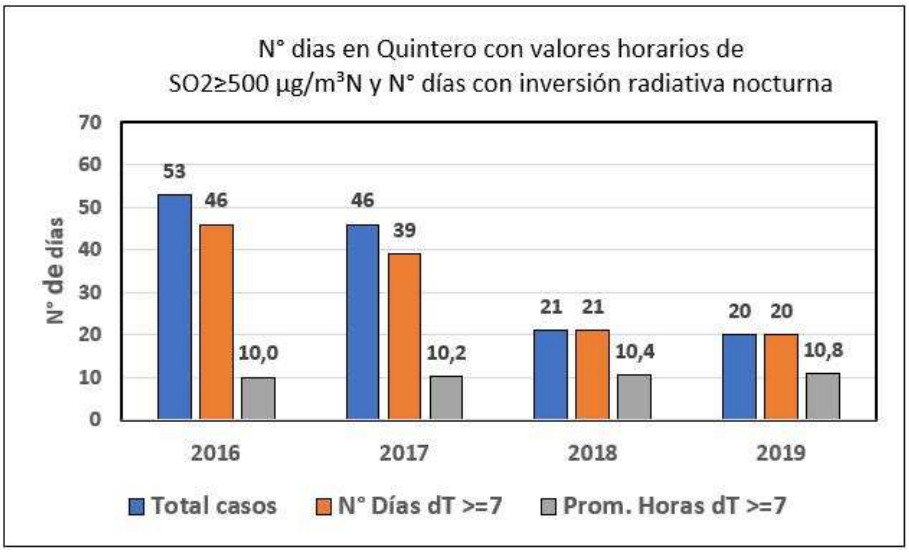
El dT entre 40 m y 10 m en la Torre meteorológica muestra un alto porcentaje de días en el año con una o más horas en que el dT>0, aumentando tanto el número de horas como la magnitud de los valores de la inversión térmica en el periodo otoño-invierno.

Para determinar la existencia de una inversión térmica significativa en el periodo nocturno, se fijó el criterio que para el periodo comprendido entre 00 y 12 H.L. en al menos 7 horas el dT registrado en la torre fuera >0. Considerando el total de mediciones horarias disponibles en el periodo 2016-2019 se comprobó que en un 52% de los días se cumplió esta condición.

La Figura 4-8 muestra que, considerados los días de episodios en el nivel de Alerta SO_2 ≥500 µg/m³N o superiores registrados en la estación de monitoreo de Quintero, se constató que en el 90% de estos días se cumplió con el criterio citado en párrafo precedente. El promedio del número de horas con dT>0 en el periodo 00 a 12 H.L. para 2016-1019 en días en que se superó el nivel de Alerta, fue de 10,0, 10,2, 10,4 y 10,8 respectivamente, excediendo aproximadamente en un 40% el criterio preestablecido de 7 horas.

La inversión térmica radiativa (ITR) por la alta frecuencia en que se presenta en el periodo nocturno cuando la estación de monitoreo de Quintero queda ubicada viento abajo de las Megafuentes del Complejo Industrial Ventanas, explicaría en buena medida las altas concentraciones de SO_2 que se registran en esa estación, en presencia de distintas configuraciones sinópticas y de mesoescala.

Figura 4-8 Número de días en Quintero con valores horarios de SO_2 ≥500 µg/m³N y días con inversión radiativa nocturna

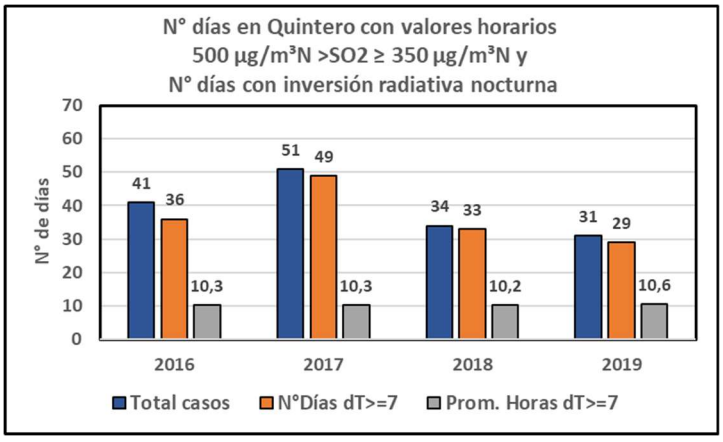


Fuente: Elaboración propia con datos de estaciones de MMA

La Figura 4-9 destaca la presencia de inversiones térmicas radiativas en días en que superó la Norma horaria de SO_2 ≥350 µg/m³N, pero no se alcanzó el nivel de Alerta de 500 µg/m³N. En días en que se superó en más de una hora el nivel de la Norma horaria, se consideró el valor más alto.

Se observa que el alto número de inversiones térmicas radiativas (ITR) asociadas a días con superación de la Norma, confirmaría lo constatado en los días en que se superó el nivel de Alerta en el sentido de que las ITR tendrían una importante incidencia en los aumentos de concentraciones de SO_2 en la estación de monitoreo de Quintero.

Figura 4-9 Número de días en Quintero con valores horarios 500 µg/m³N >SO_2 ≥350 µg/m³N y días con inversión radiativa nocturna, y promedio de las horas con dT ≥7

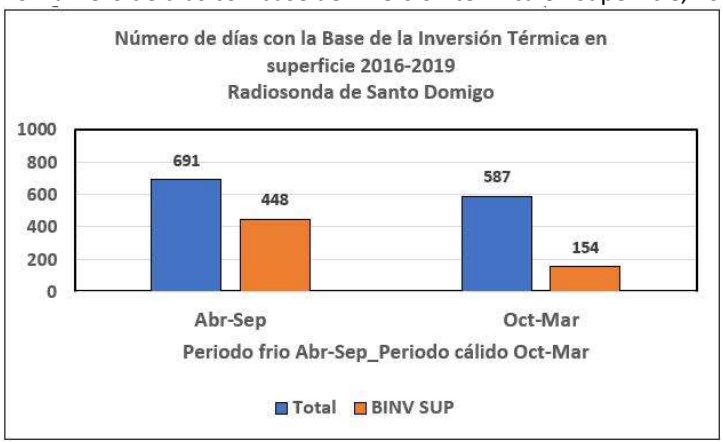


Fuente: Elaboración propia con datos estaciones MMA

En la Figura 4-10 se observa el alto número de inversiones radiativas en el periodo frío (Abr-Sep.) respecto al cálido (Oct-Mar). De 691 días con información disponible del radiosondeo de Santo

Domingo para el periodo frío, en 448 días se registraron inversiones por enfriamiento nocturno, equivalente al 65% del total de días. En el periodo cálido, de 587 días en que se contó con información del radiosondeo de Santo Domingo, en 154 días se registraron inversiones radiativas, equivalente a un 26% del total de días.

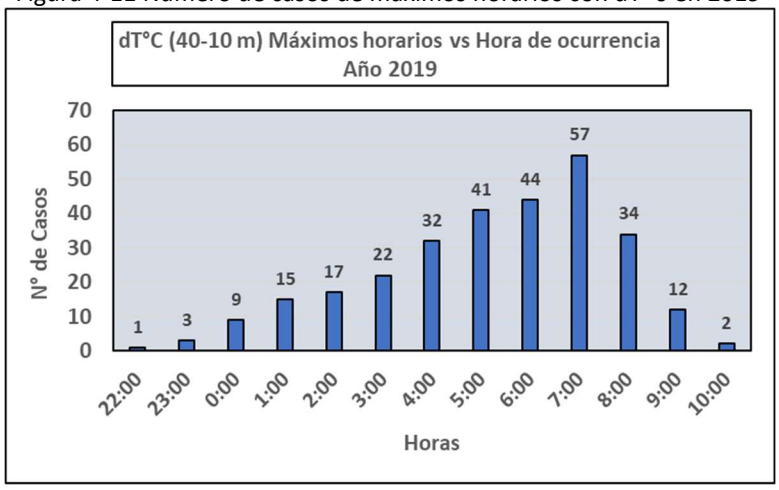
Figura 4-10 Número de días con base de inversión térmica en superficie, 2016-2019



Fuente: Elaboración propia con datos del Radiosonda de Santo Domingo

Se observa en la Figura 4-11 que el número de casos con máximos horarios con dT> 0 crece gradualmente desde las 22 H.L. hasta las 07 H.L., (aproximadamente hora de la temperatura mínima) para decrecer posteriormente de forma abrupta al comenzar el calentamiento diurno de 08 a 10 H.L.

Figura 4-11 Número de casos de máximos horarios con dT>0 en 2019



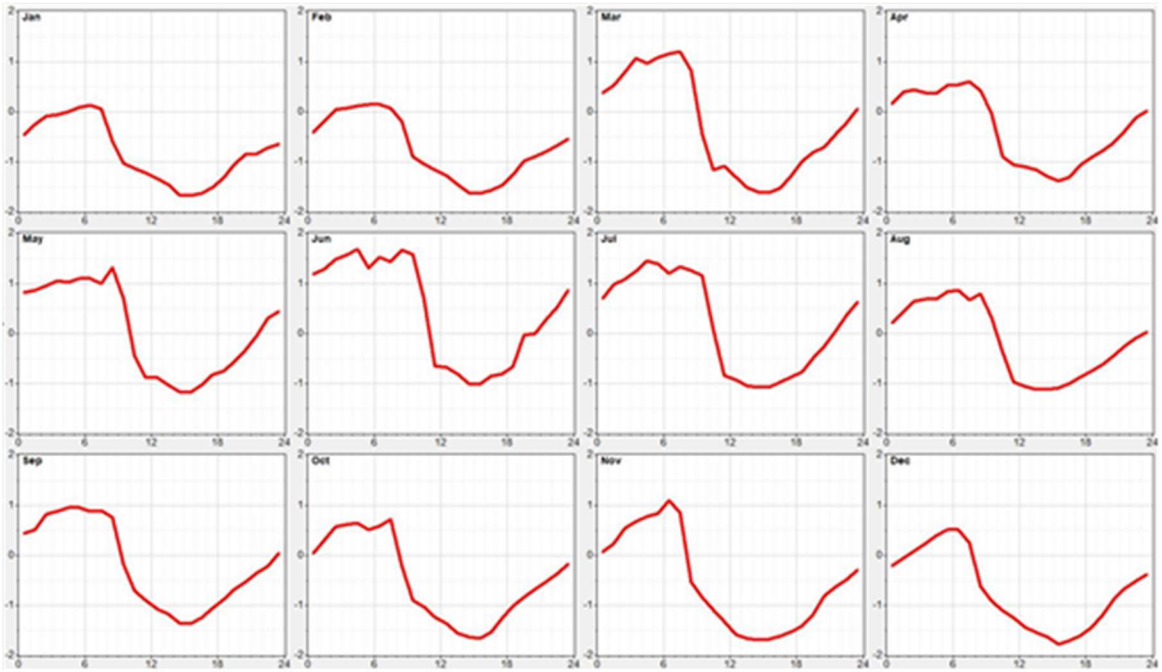
Fuente: Elaboración propia con datos de MMA

4.4.3 Ciclo diario de la estabilidad superficial

La Figura 4-12 muestra el ciclo diario promedio para cada mes, de la diferencia de temperatura entre 40 y 10 m en la Torre Meteorológica para el año 2018. El dT se grafica en el eje de ordenadas con escala -2 a 2°C (valores positivos para perfil estable, y negativos para perfil inestable), mientras que en eje de las abscisas están las horas del día.

El valor de la diferencia de temperatura muestra un ciclo diario promedio mensual definido, con variaciones en la amplitud y duración de máximos y mínimos. Los meses con mayor número de horas con valores dT>0 (estable), corresponden al periodo marzo-septiembre, debido a la mayor duración del período nocturno respecto al periodo estival y consecuentemente una mayor cantidad de horas de pérdida de calor durante la noche. Los gráficos para el resto de los años del periodo 2016-2019 se encuentran en Anexos.

Figura 4-12 Ciclo diario promedio mensual de la diferencia de Temperatura 40-10m año 2018

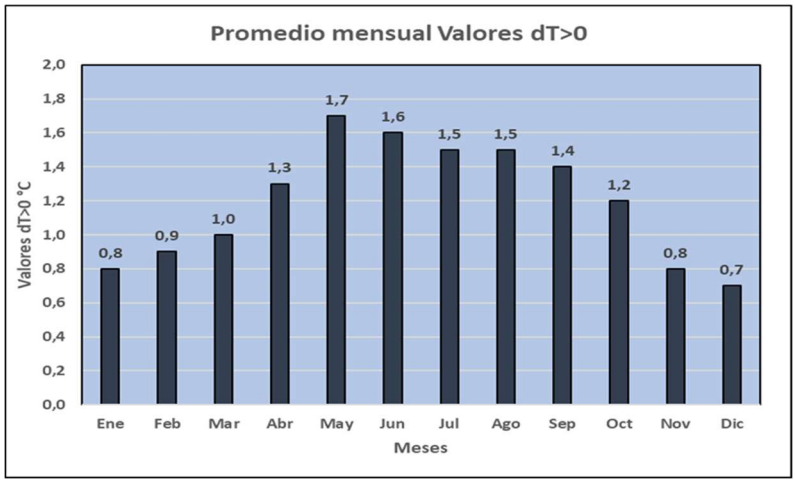


Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y WindoGrapher

4.4.4 Ciclo estacional de la estabilidad superficial

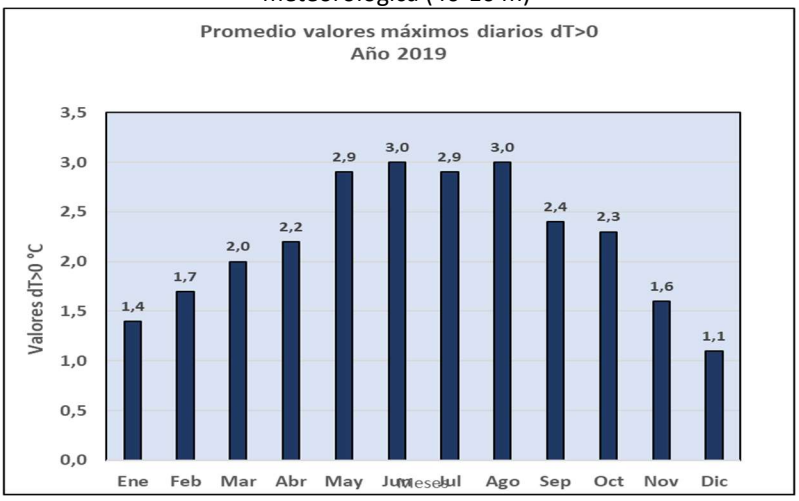
La Figura 4-13 y la Figura 4-14 muestran que los promedios y máximos diarios mensuales con un dT>0, que implica la presencia de una inversión de temperatura entre 40 y 10 m s.n.s., se presenta principalmente en otoño-invierno, lo que se traduciría en inversiones térmicas de mayor duración y más intensas en el periodo frío.

Figura 4-13 Promedios mensuales de la diferencia de temperatura dT>0 en la torre meteorológica (40-10 m) año 2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA

Figura 4-14 Promedio valores máximos diarios mensuales con diferencia de temperatura dT>0 en la torre meteorológica (40-10 m)

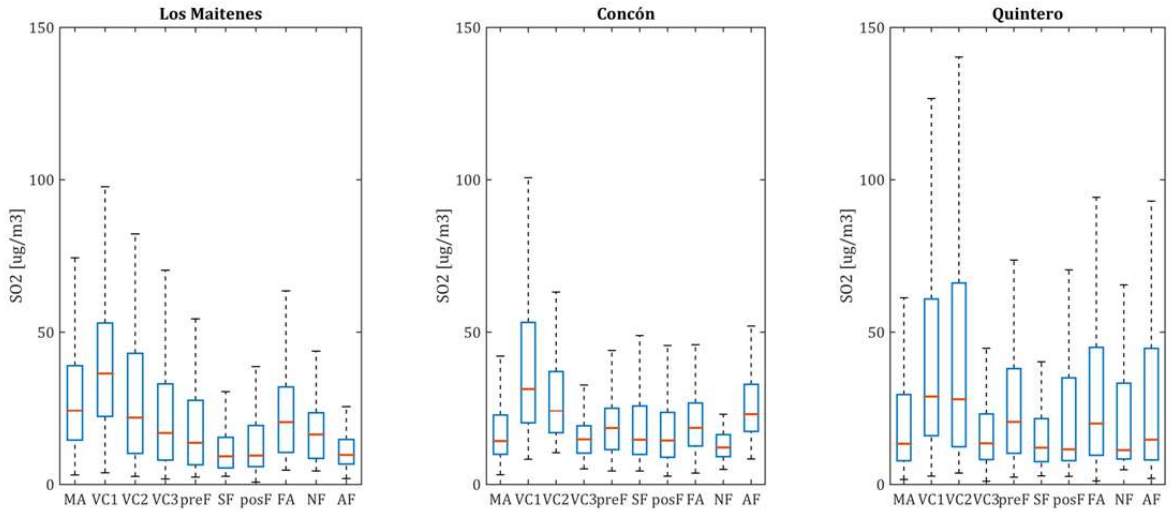


Fuente: Elaboración propia con datos de MMA

4.4.5 Condiciones de calidad de aire a escala regional

De acuerdo con la Figura 4-15, los promedios diarios de SO_2 muestran ser sensibles a las condiciones sinópticas y de mesoescala imperantes, sin embargo, no de la misma manera en Puchuncaví, Quintero y Concón. En la estación Los Maitenes, las mayores concentraciones se presentan bajo condiciones de desarrollo de vaguada costera, pero también bajo margen anticiclónico, culminación de vaguada costera y frente en altura. En Concón, es notable la diferencia entre el desarrollo de las vaguadas costeras con el resto de las configuraciones; las concentraciones también aumentan bajo condiciones de culminación de vaguada costera y altas presiones frías. En Quintero, el desarrollo y culminación de la vaguada costera son las configuraciones que asocian las mayores concentraciones diarias de SO_2.

Figura 4-15 Concentración diaria de SO_2 en las estaciones Los Maitenes, Concón y Quintero para cada configuración sinóptica.



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y Configuraciones meteorológicas

En este análisis se excluyeron los valores escapados u *outliers*, para observar con mayor detalle el comportamiento del SO_2 de acuerdo con cada configuración sinóptica, no obstante, tanto el rango intercuartil (las cajas) como los bigotes (valores máximos y mínimos no considerados *outliers* en la distribución) están influenciados por los valores extremos altos. Los valores escapados serán analizados más adelante.

Los resultados expuestos anteriormente presentan la limitante de que promedian condiciones tanto de invierno como de verano, por lo que el resultado puede estar suavizado y se pueden estar perdiendo rasgos característicos de cada época del año. Ahora bien, a pesar de esta limitante (que será solventada más adelante), los resultados expuestos aquí permiten identificar que tanto el desarrollo como la culminación de vaguada costera son las principales configuraciones forzantes de bajas condiciones de ventilación y valores altos de SO_2. No obstante, otras configuraciones también mostraron signos de estabilidad y reducción de la estabilidad y será importante mirarlas con detención; éstas son el margen anticiclónico, post-frontal, frente en altura y alta fría.

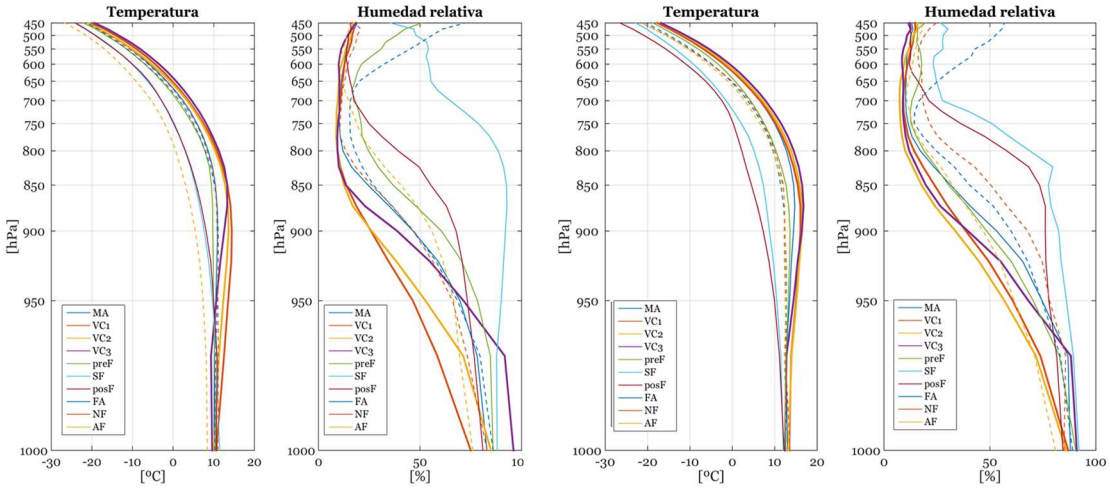
Condiciones generalmente inestables se presentan bajo la disipación de vaguada costera, prefrontal, presencia de un sistema frontal y núcleo frío en altura.

4.4.6 Comportamiento vertical de la atmósfera y la estabilidad según configuración sinóptica para período frío y cálido

Para precisar el comportamiento vertical de la atmósfera y la estabilidad en cada configuración sinóptica según la estación del año, se dividió el análisis en estación fría y estación cálida. La estación fría fue definida como el periodo entre abril y septiembre, y la estación cálida fue definida como el periodo entre octubre y marzo.

Las características térmicas y de humedad en la columna troposférica de cada configuración se presentan en la Figura 4-16. Se puede observar, como era esperable, que durante la temporada cálida los perfiles medios en las capas inferiores presentan en general mayores valores de temperatura. Los primeros metros, entre la superficie (75 m) y aproximadamente los 850 hPa, son en general de temperatura constante (en promedio) para luego descender la temperatura entre 6.6 y 9.8 °C/Km. Sin embargo, se observa que en la temporada cálida este descenso comienza ligeramente a mayor altura, levemente por sobre los 850 hPa, mientras que en invierno el descenso comienza ligeramente por debajo de los 850 hPa. Esto puede estar asociado a una capa límite con mezcla más vigorosa durante la temporada cálida debido a un mayor calentamiento superficial. Lo anterior se estudiará con mayor detalle con la altura de la base de inversión térmica, pero es un primer indicador de que la mezcla y por lo tanto la ventilación son mayores durante la temporada cálida.

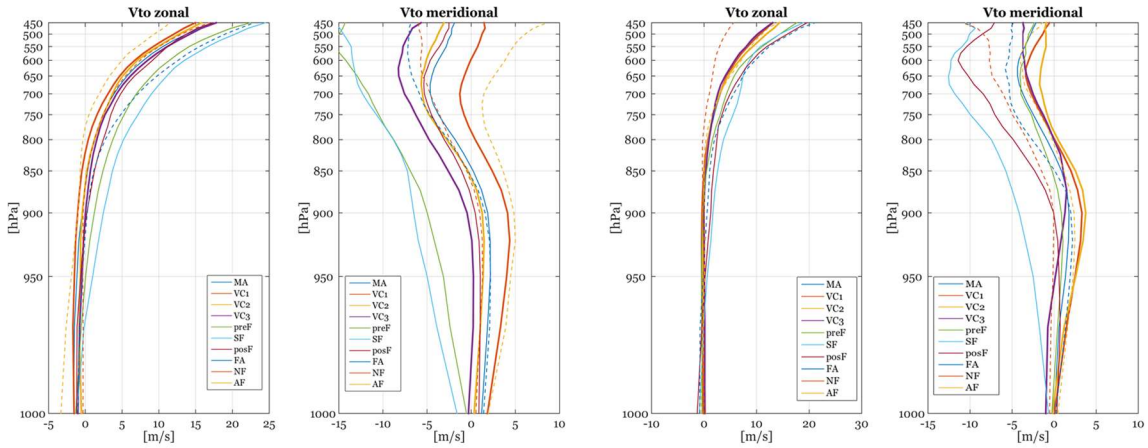
Figura 4-16 Perfil de temperatura y humedad relativa media en Santo Domingo para cada configuración sinóptica en periodo frío (izquierda) y periodo cálido (derecha).



Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Radiosonda Santo Domingo

La capa inferior de la troposfera, bajo los 850 hPa, durante la temporada cálida en promedio se presentan condiciones más húmedas (Figura 4-16) y con viento con una mayor predominancia desde el oeste (Figura 4-17). Esto puede significar una mayor cantidad de días con ingreso de nubosidad costera o de aire húmedo desde la costa durante la temporada cálida. El viento meridional tiene una mayor predominancia desde el sur durante el periodo cálido, lo que puede estar asociado a la mayor cantidad de días bajo el margen anticiclónico. Durante el invierno, el viento meridional es más variable en las capas bajas. Las magnitudes del viento son mayores en general durante la temporada fría, desde superficie, donde las diferencias son menores, hasta las capas superiores donde las diferencias son mayores.

Figura 4-17 Perfil de viento zonal y meridional medio en Santo Domingo para cada configuración sinóptica en periodo frío (izquierda) y periodo cálido (derecha).



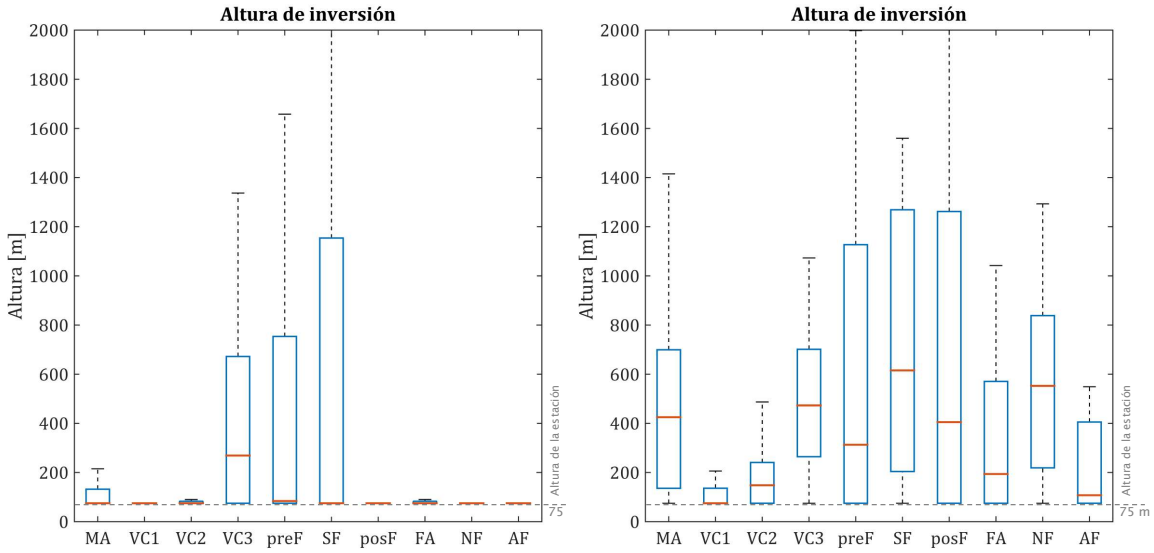
Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Radiosonda Santo Domingo

La altura de la base de la inversión térmica, en la Figura 4-18, presenta importantes diferencias entre la temporada fría y la temporada cálida. Durante los meses de invierno la altura de la base de la inversión es menor que durante la temporada cálida. Esto es lo que se evidenciaba en los perfiles de temperatura, reafirmando la idea de que independiente de la configuración sinóptica durante la temporada cálida existe una mayor mezcla permitiendo que la base de la inversión térmica sea mayor que durante el periodo frío.

Durante la temporada cálida, el calentamiento superficial es mayor, lo que permite movimientos turbulentos más vigorosos, lo que a su vez favorece el crecimiento de capa de mezcla. Esta es una de las razones por las cuales la ventilación que se deteriora mayormente durante el invierno mejora en verano. Este comportamiento también se puede observar durante el ciclo diario; una capa límite reducida se observa típicamente durante el periodo nocturno, cuando el calentamiento de la superficie es inexistente, mientras que durante el periodo diurno la capa

límite crece, lo que permite una mayor dispersión de contaminantes[51].

Figura 4-18 Altura de la base para las inversiones térmicas durante la mañana (12Z) en Santo Domingo para cada configuración sinóptica en periodo frío (izquierda) y periodo cálido (derecha).



Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Radiosonda Santo Domingo

En promedio, la altura de la base de la inversión térmica se ubica a 360 m en Santo Domingo, lo que disminuye a 250 m durante la temporada fría y aumenta a 470 m durante la temporada cálida.

Estos valores medios son menores a los observados en Antofagasta por ejemplo (en donde los valores medios oscilan alrededor de los 900 m[52]), pero muestran el mismo comportamiento de ser menores durante la temporada fría y mayores durante la temporada cálida.

Durante la temporada fría la mayoría de las configuraciones muestran alturas medias de la base de la inversión en -o muy cerca- de los 75 metros que corresponden al nivel del suelo en el lugar de lanzamiento. No se logra discriminar de buena manera aquellas configuraciones que asocian condiciones inestables, como el pre-frontal y sistema frontal. Esto se debe a la persistente formación de inversiones térmicas radiativas, muy cerca de la superficie debidas al enfriamiento nocturno del suelo. Durante la temporada cálida este comportamiento no se aprecia y las configuraciones que muestran menores alturas en la inversión son las que generalmente están

[51]Muñoz, R. C., &Undurraga, A. A. (2010). Daytime mixed layer over the Santiago Basin: Description of two years of observations with a lidar ceilometer. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *49*(8), 1728-1741.

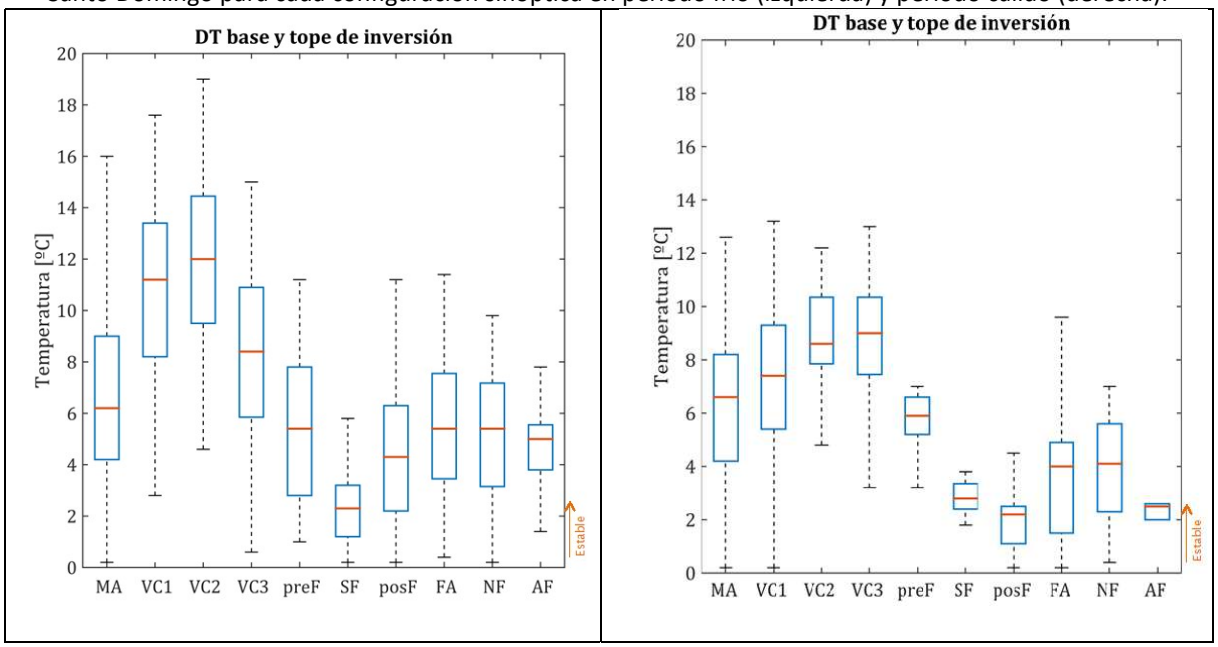
[52]Muñoz, R. C., Zamora, R. A., & Rutllant, J. A. (2011). The coastal boundary layer at the eastern margin of the southeast Pacific (23.4 S, 70.4 W): Cloudiness-conditioned climatology. *Journal of climate*, *24*(4), 1013-1033.

asociadas a condiciones estables, como el desarrollo y culminación de vaguada costera y altas frías.

Las diferencias de temperatura entre base y tope son mayores durante la temporada fría (Figura 4-19), también asociado al mayor enfriamiento superficial durante la temporada fría y en general las diferencias son positivas (para la mediana) con excepción de sistemas frontales y núcleos fríos. Las mayores diferencias positivas se presentan bajo condiciones de desarrollo y culminación de vaguada costera, con diferencias medias por sobre los 10°C, mientras que con margen anticiclónico y disipación de vaguada costera las diferencias son menores.

Durante la temporada cálida las mayores diferencias positivas de temperatura se presentan con las tres fases de la vaguada costera y en presencia de margen anticiclónico. A pesar de estas diferencias positivas, que indican condiciones de estabilidad, las alturas de la base de inversión son más elevadas que en la temporada fría, por lo tanto la estabilidad no se presenta directamente sobre la capa de mezcla superficial.

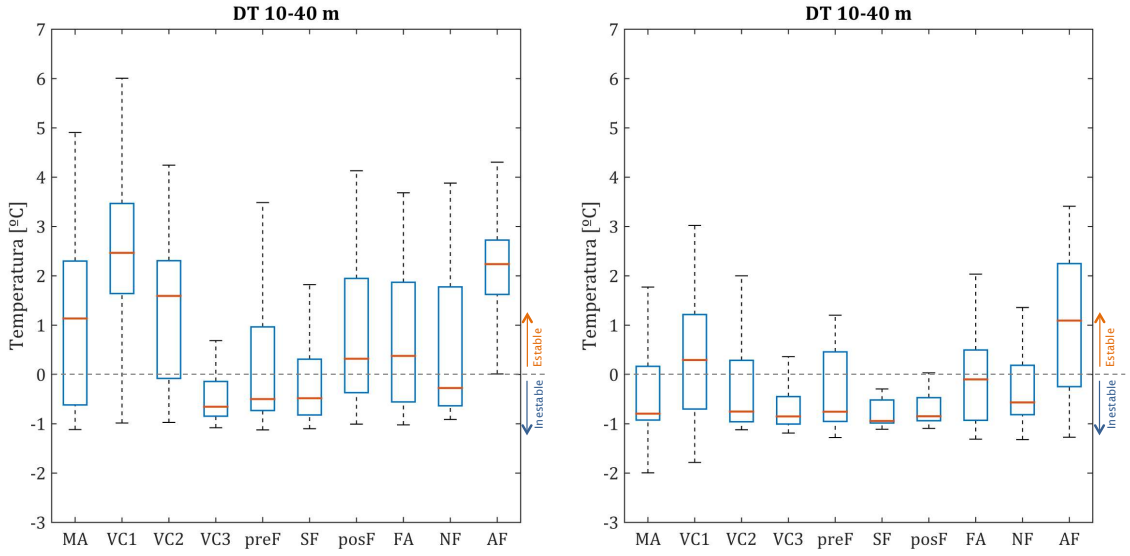
Figura 4-19 Diferencia de temperatura entre base y tope para las inversiones térmicas durante la mañana en Santo Domingo para cada configuración sinóptica en periodo frío (izquierda) y periodo cálido (derecha).



Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Radiosonda Santo Domingo

La estabilidad local se mide utilizando el gradiente vertical de temperatura entre 10 y 40 m. con los datos de la torre Principal. En la Figura 4-20 se puede ver una gran diferencia entre la temporada fría y la temporada cálida. Durante la temporada cálida, la mayoría de las configuraciones muestran condiciones inestables, mientras que durante la temporada fría la mayoría de las configuraciones muestra condiciones estables. Las configuraciones que muestran un perfil estable en ambas temporadas son el desarrollo de vaguada costera y la alta presión fría.

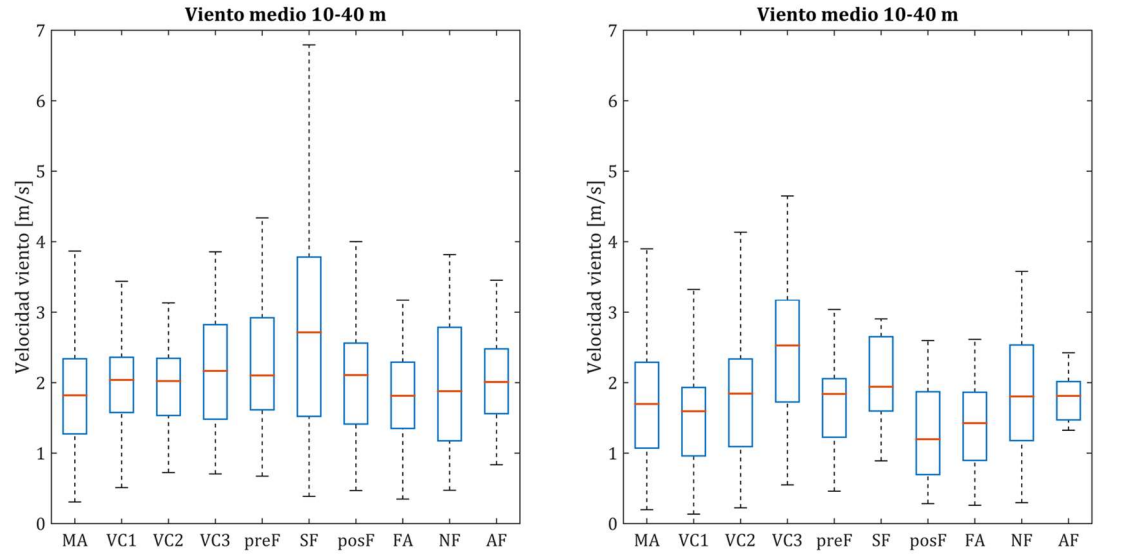
Figura 4-20 Diferencia de temperatura entre 10 y 40 metros en la torre meteorológica Principal para cada configuración sinóptica en periodo frío (izquierda) y periodo cálido (derecha).



Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Torre Meteorológica

La magnitud del viento en esta capa entre 10 y 40 m no muestra grandes diferencias entre la temporada fría y cálida (Figura 4-21). Sin embargo, en general, las magnitudes son mayores durante la temporada fría, incluso en las configuraciones sinópticas asociadas a mayor estabilidad, como el desarrollo y culminación de vaguada costera.

Figura 4-21 Viento medio entre 10 y 40 metros en la torre meteorológica Principal para cada configuración sinóptica en periodo frío (izquierda) y periodo cálido (derecha).



Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Torre Meteorológica

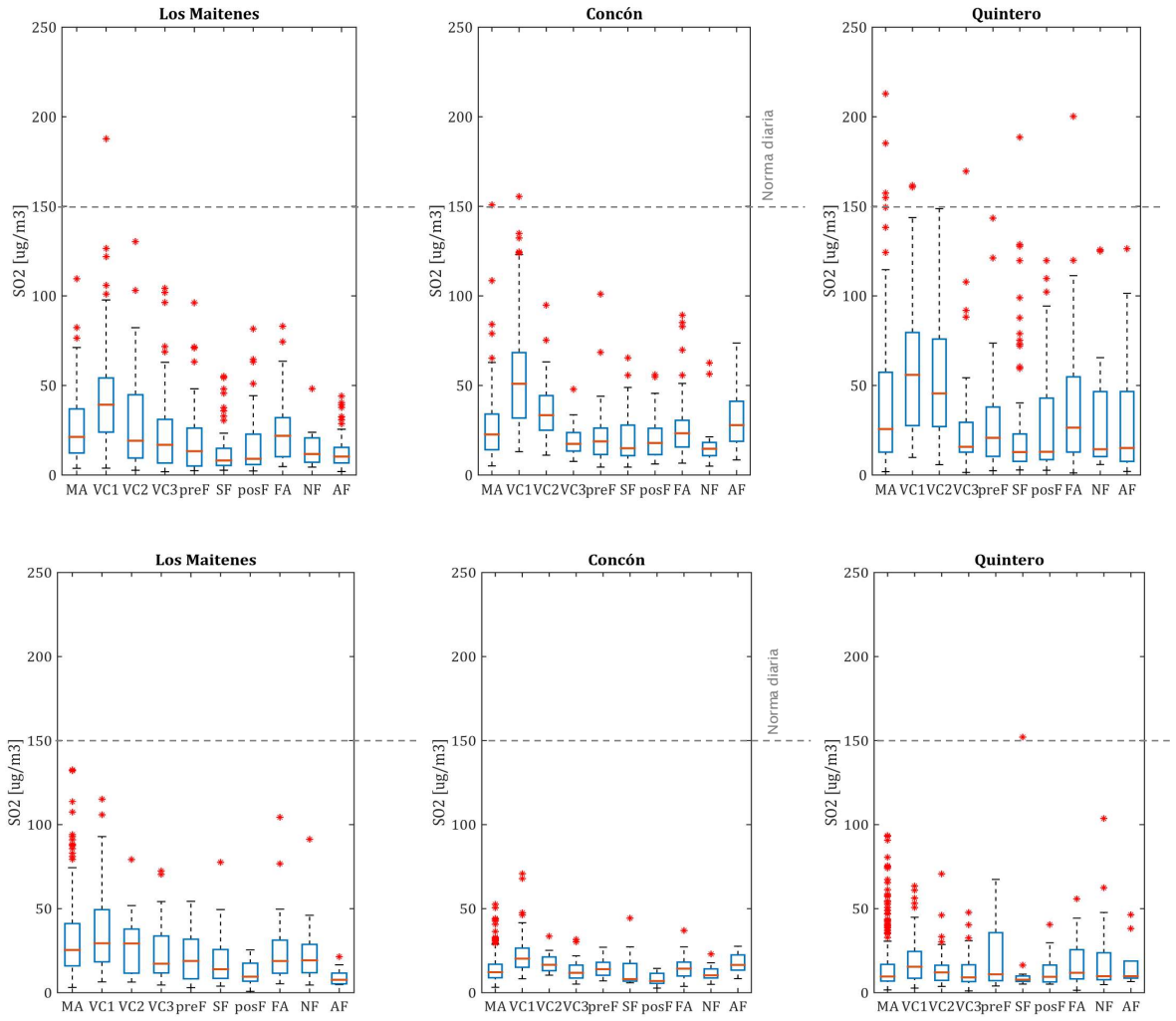
4.4.7 Concentraciones diarias de SO_2 para estaciones de calidad del aire según configuración sinóptica en período frío y cálido considerando outliers

La Figura 4-22 muestra las concentraciones diarias de SO_2 para las estaciones Los Maitenes, Concón y Quintero según configuración sinóptica en el periodo frío y en el periodo cálido, incluyendo los valores considerados *outliers*. En términos generales, en el periodo frío las concentraciones son mayores en las tres estaciones estudiadas y el número de días en que se supera la norma diaria también es mayor. Esto está asociado a las diferentes señales de una mayor estabilidad tanto en la escala regional como local, así como también una menor altura de la capa de mezcla durante la temporada fría.

En Los Maitenes, tanto en la temporada fría como en la temporada cálida el desarrollo de vaguada costera es la configuración que asocia las mayores concentraciones, incluso superando la norma diaria en una oportunidad en el periodo frío. También se observan concentraciones relativamente altas asociadas al margen anticiclónico, principalmente en la temporada cálida. En Concón, se observa una situación similar a la observada en Los Maitenes, el desarrollo de vaguada costera y el margen anticiclónico se asocian a los dos eventos de superación de norma durante la temporada fría (entre 2016 y 2019).

En Quintero en cambio se observa un comportamiento distinto a las otras estaciones. En cuanto a comportamiento medio, dejando de lado por un momento los outliers, durante la temporada fría las mayores concentraciones se asocian a desarrollo y culminación de vaguada costera y en segundo lugar a margen anticiclónico y frente en altura. Sin embargo, las superaciones de norma se presentan aparentemente de manera independiente a la configuración sinóptica regional.

Figura 4-22 Concentración diaria de SO_2 en las estaciones Los Maitenes, Concón y Quintero para cada configuración sinóptica en periodo frío (arriba) y periodo cálido (abajo).



Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y datos de estaciones de monitoreo

Se puede observar que las superaciones de norma en Quintero se presentan con mayor frecuencia bajo la presencia de margen anticiclónico, no obstante, en la temporada fría también se supera la norma con otras configuraciones incluidas configuraciones asociadas a condiciones más bien inestables, como la presencia de sistema frontal. Es llamativo que incluso en la temporada cálida se supera la norma con sistema frontal. Esto se puede deber a condiciones de escala local como inversiones radiativas por enfriamiento nocturno o estabilidad prefrontal que reducen las condiciones de ventilación. Se debe considerar además que el perfil entregado por la sonda es sólo de ese momento, y se dan casos en que se identificó como condición relevante del día un SF, pero este frente entró durante la tarde, horas después del lanzamiento de la sonda. También, de acuerdo con la experiencia operacional del equipo consultor en la zona, se ha visto que en Quintero prima la inversión térmica radiativa mientras el cielo esté despejado, antes de la entrada

de la nubosidad asociada al frente. Por otra parte, un aumento brusco en las emisiones también puede producir un aumento en las concentraciones, incluso en días sin una marcada estabilidad. Dado que operacionalmente, las emisiones pueden ser mayores en días con buena ventilación, un empeoramiento transitorio (un par de horas) en las condiciones de ventilación podría provocar un rápido aumento en las concentraciones y reflejarse en los promedios diarios.

Conclusión: Estos resultados sugieren que durante la temporada fría las condiciones de ventilación en Quintero se verían empeoradas principalmente en presencia de las fases de formación y culminación de bajas costeras, margen anticiclónico y frente en altura. Sin embargo, en presencia de otras configuraciones también se presenta superaciones de norma, lo que se debería a la persistente formación de inversiones radiativas.
En Los Maitenes y Concón en tanto, predominarían principalmente la formación de vaguada costera y la acción del anticiclón semipermanente del Pacífico Suroriental.
La estacionalidad de la estabilidad parece estar relacionada con un menor (mayor) calentamiento de la superficie durante la temporada fría (cálida). Esto se relaciona también con un mayor número de episodios de altas concentraciones durante la temporada fría, sin embargo, estos episodios no son exclusivos de esta temporada. Los episodios tampoco son exclusivos de ciertas condiciones sinópticas, lo que puede estar asociado a empeoramientos transitorios de la ventilación y/o a un aumento brusco en las emisiones.

5 Producto iv de BT: Clasificación de los fenómenos meteorológicos a distintas escalas, su frecuencia de ocurrencia y su relación con el desarrollo de eventos de aumento de concentraciones de contaminantes atmosféricos

El objetivo de este producto consiste en clasificar las configuraciones meteorológicas asociadas a un aumento de las concentraciones de SO_2 y MP2,5.

En Anexos se incluyen los antecedentes generales climatológicos de la zona que sirven de base para este capítulo del estudio.

5.1 Conceptos generales configuraciones meteorológicas a escalas sinóptica y mesoescala o regional

Los conceptos generales integrados en este capítulo son las configuraciones meteorológicas, por lo que a continuación se describen las configuraciones más relevantes para este estudio:

5.1.1 Vaguadas Costeras, Episodios Tipo A y BPF

Las vaguadas o bajas costeras se clasifican en dos tipos principales: Las más frecuentes, Tipo A, dan cuenta de un 61% de los casos y las Tipo BPF representan un 32% de ocurrencia[53].

Un tercer tipo (Tipo B), se presentaría a fines de primavera y verano en Chile Central, cuando los sistemas frontales alcanzan típicamente su posición más austral. Durante estas ocasiones una vaguada térmica climatológica está normalmente posicionada sobre el noroeste de Argentina. En estos casos es posible encontrar configuraciones Tipo A más al sur, con vaguadas costeras alcanzando ocasionalmente 41° o 42° S.[54]

Las vaguadas costera Tipo A comienza a desarrollarse en superficie, típicamente después del paso de un sistema frontal que se ha desplazado hacia el Noreste en su estado de disipación. La baja o vaguada costera, evoluciona entre un fortalecido anticiclón subtropical suroriental y una alta fría migratoria sobre Argentina. A medida que la vaguada costera se desplaza desde el norte chico hacia la zona centro sur, el borde delantero de la baja asocia cielo despejado, condiciones cálidas y secas, la base de la inversión de subsidencia desciende, alcanzando en ocasiones el nivel de superficie, mientras que adelante del centro de la baja la presión disminuye. Al presentarse el borde trasero de la baja se produce un drástico cambio en las condiciones, se registra cielo cubierto con nubosidad baja, aire frío y húmedo, un ascenso presión superficial y de la base de la inversión térmica de subsidencia.

[53]Rutllant J., 1993: Coastal lows and associated southerly wind events in north-central Chile.
[54]Rutllant J., 1994: On the generation of coastal lows in Central Chile.

En su etapa de formación presenta una forzante sinóptica en la troposfera media, consistente en la aproximación de una dorsal, caracterizada por descenso de masas de aire, calentamiento por compresión adiabática e intensificación de la inversión térmica de subsidencia.

Las Tipo BPF, corresponden a una condición prefrontal y presenta una menor definición en comparación a las Tipo A. En relación con su origen, se puede interpretar como el estado final de evolución de una condición Tipo A, cuando el desplazamiento hacia el sur de la baja costera se encuentra con un sistema frontal que aproxima. En la troposfera media se presenta una vaguada, que acompaña al sistema frontal, que normalmente tiene características de débil u ocluido y que asocia típicamente abundante nubosidad media y alta.[55]

En el presente estudio el análisis se centrará en analizar el comportamiento de las vaguadas costeras Tipo A, por ser las que de acuerdo con la bibliografía presentan una mejor definición y dan cuenta del mayor porcentaje de casos. Sin embargo, no se puede descartar que algunos episodios asociados a una clasificación de condiciones prefrontales (PreF) o frentes en altura (FA) pudieran corresponder al Tipo BPF.

La vaguada costera Tipo A en su evolución presenta tres etapas: Desarrollo, culminación y disipación.[56]

La etapa de desarrollo (VC1), representa la etapa más restrictiva en cuanto al factor meteorológico de ventilación, cuando la altura de la capa de mezcla marina (CMM) o capa de mezcla superficial disminuye significativamente, alcanzando frecuentemente la superficie[57]. La diferencia de temperatura entre la base y el tope de la inversión se acentúa y prevalece una advección seca y cálida del Este asociada a subsidencia forzada en la ladera andina occidental. La nubosidad baja costera retrocede hacia el oeste-noroeste, presentándose cielo despejado sobre el Pacífico en una extensión que dependería de la intensidad de la subsidencia y de la magnitud del viento de componente Este a niveles bajos. En la troposfera media se observa la aproximación de una dorsal.

La etapa de culminación (VC2) corresponde a la presencia del mínimo de presión frente a la zona de estudio, se mantiene el área despejada sobre el Pacífico, en tanto una cuña de nubosidad baja se desplaza desde el norte chico y se sitúa ligeramente al norte del mínimo barométrico. En altura, en la troposfera media, se presenta el eje de una dorsal.

En la etapa de disipación (VC3) se observa un cambio drástico de las condiciones a niveles bajos, la nubosidad (estratos, estratocúmulos) irrumpe al litoral central y en ocasiones a los valles, asociado a un crecimiento de la capa de mezcla marina CMM y ascenso de la presión atmosférica, el viento rota típicamente hacia el WNW asociando una advección fría y húmeda. En 500 hPa se observa el

[55]Rutllant J., 1994: On the generation of Coastal Lows in Central Chile.
[56]Garreaud R., Rutllant J., Fuenzalida H.,2000: Coastal Lows in the Subtropical West Coast of South America: Mean Structure and Evolution.
[57]Rutllant J., 1981: Subsidencia forzada sobre la ladera andina occidental y su relación con un episodio de contaminación atmosférica en Santiago. Tralka, 2 57-76.

paso de la dorsal y aproximación de una vaguada desde el Oeste, la que en el periodo invernal está frecuentemente asociada a un sistema frontal.

5.1.2 Sistemas frontales

Los sistemas frontales (SF) presentan en altura, típicamente, una vaguada desfasada hacia el oeste o suroeste respecto a la posición del frente en superficie. Cuando el sistema frontal se extiende zonalmente, la curvatura es mínima y se detecta principalmente por un fuerte gradiente de isohipsas en la troposfera media, debido al contraste de masas de aire entre una masa de aire cálida de origen tropical y una masa de aire frío de origen polar. Los sistemas frontales alcanzan la zona de estudio principalmente durante el invierno, con menor frecuencia en las estaciones de transición primavera y otoño, y sólo excepcionalmente en verano.

Poco antes de la irrupción de un sistema frontal, en condiciones prefrontales (PreF), las condiciones de ventilación pueden ser malas (condiciones BPF), de mantenerse condiciones de estabilidad y vientos débiles a niveles bajos.[58]

5.1.3 Sistemas frontales en altura

En los frentes en altura la discontinuidad de masas de aire se observa sólo en la troposfera media y alta, asociando típicamente nubosidad del tipo altocúmulos, altoestratos y cirrus. Dependiendo del espesor de la cobertura nubosa, disminuiría la incidencia de radiación de onda corta proveniente del sol, reduciendo el calentamiento de la superficie terrestre y consecuentemente el viento superficial, lo que produciría un deterioro de las condiciones medias de ventilación. Por otra parte, en el periodo nocturno, disminuye la pérdida de calor por radiación de onda larga desde la superficie terrestre.

5.1.4 Altas frías migratorias

Las altas frías migratorias se desplazan siguiendo a los sistemas frontales y forman parte de la masa de aire frío. Asocian típicamente anomalías positivas de la presión en superficie y negativas de la temperatura mínima, normalmente presentan cielos despejados lo que asociado a las bajas temperaturas favorecen la formación de inversiones radiativas nocturnas.

5.1.5 Bajas segregadas o núcleos fríos en altura

Las bajas segregadas en altura o núcleos fríos se caracterizan por una vaguada con un centro cerrado de bajas presiones y temperatura en la troposfera media. Presenta su mayor actividad al encontrarse con barreras topográficas como la Cordillera de Los Andes, ya que se fortalecen los

[58]Rutllant J., Garreaud R., 1994: Meteorological Air Pollution for Santiago de Chile: Towards an objective episode forecasting.

movimientos de ascenso y desarrollo nuboso. En algunas ocasiones la vorticidad ciclónica se propaga hacia niveles bajos, pudiendo adquirir reflejo en superficie.

Cuando la baja segregada en altura se presenta frente al norte chico y la zona central queda ubicada en su borde sur, se registran en altura vientos generalizados de componente Este, determinando subsidencia forzada en la ladera andina occidental, intensificación de la inversión de subsidencia y disminución de la altura de la capa de mezcla.[59]

5.2 Datos y métodos

5.2.1 Datos e información meteorológica para identificar las configuraciones sinópticas y de mesoescala

5.2.1.1 Base de datos para identificar configuraciones

Se levantó una base de datos con información necesaria para identificar las configuraciones que se presentaron diariamente en el área de estudio durante el periodo 2016-2019.

La información utilizada para caracterizar las distintas configuraciones meteorológicas fue la siguiente:

- Mapas de Análisis del GFS[60]: Altura geopotencial y vorticidad a 500 hPa; Presión al nivel del mar y espesor 1000-500 hPa; Velocidad vertical y precipitación a 700 hPa; Altura geopotencial, vorticidad relativa y viento a 500 hPa; Corriente en chorro e isotacas a 200 hPa, Agua precipitable y Energía Convectiva Potencial Disponible (CAPE), Mapa de cobertura nubosa baja media y alta, representada por la humedad relativa a 800hPa, 500hPa y 300 hPa.
- Imágenes satelitales GOES Espectros: infrarrojo (IR), onda corta (SW), vapor de agua (WV), visible (VIS).
- Meteogramas: NOAA[61] y WRF[62] DMC[63].
- Cartas de superficie: DIRECTEMAR[64] Campos de presión, espesor 1000-500, ubicación de sistemas frontales.
- Radiosondeos diarios de Santo Domingo.

[59]Rutllant., Garreaud., 2006
Contaminación Atmosférica Urbana: Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Editor Morales R. Capítulo Merino.M.
[60]GFS Global ForecastSystem. Resolución horizontal de 13 km y 64 niveles en la vertical
[61]National Oceanic and Atmospheric Administration
[62]Weather Research and Forecasting Model
[63]Dirección Meteorológica de Chile
[64]Dirección General de Territorio Marítimo. Armada de Chile

5.2.1.2 Definición de configuraciones y parámetros analizados de escalas sinóptica y mesoescala[65]

Sobre la base de la información analizada, se definieron las configuraciones y parámetros a escala sinóptica y mesoescala:

- AS: Anticiclón subtropical del Pacífico Sur-oriental
  Una de las altas semipermanentes del cinturón subtropical de altas presiones.
- ITS: Inversión térmica de subsidencia
  Aumento de la temperatura con la altura producida por el calentamiento adiabático de una masa de aire que desciende.
- D: Dorsal en 500 hPa
  Área elongada de presión atmosférica relativamente alta en 500 hPa, casi siempre asociada y más claramente identificada como un área de máxima curvatura anticiclónica del flujo de viento.
- V: Vaguada en 500 hPa
  Área elongada de presión atmosférica relativamente baja en 500 hPa, casi siempre asociada y más claramente identificada como un área de máxima curvatura ciclónica del flujo de viento.
- Z: Flujo zonal en 500 hPa
  El flujo de aire a lo largo de un círculo de latitud en 500 hPa, más específicamente la componente latitudinal (este u oeste) del flujo existente.
- SFS: Sistema frontal en superficie
  Zona de encuentro entre dos masas de aire de distintas características termodinámicas, tal y como son representados en los mapas o cartas sinópticas.
- SFA: Sistema frontal en altura
  Zona de encuentro entre dos masas de aire de distintas características termodinámicas en la que la discontinuidad se presenta sólo en altura.
- JS: Jet Stream
  Vientos relativamente fuertes concentrados dentro de una corriente estrecha en la atmósfera.
- NF: Núcleo frío o baja segregada en altura
  Depresión fría que se ha desplazado hacia el ecuador con respecto a la corriente básica del oeste en que estaba inmersa.
- AF: Anticiclón frío migratorio
  En un nivel dado de la atmósfera una alta presión que se caracteriza típicamente por aire más frío cerca de su centro que alrededor de su periferia.
- VC: Vaguada o baja costera[66]

[65] American Meteorological Society (AMS) https://glossary.ametsoc.org/
Glosario Organización Meteorológica Mundial https://unterm.un.org/

[66] Garreaud, R; Rutllant J; Fuenzalida H. Coastal Lows along the Subtropical West Coast of South America: Mean Structure and Evolution. 2001

Centro de baja presión de escala subsinóptica, de poco espesor, no asociado al frente polar. Se origina en la costa del Norte Chico/Zona Central y se desplaza típicamente de Norte a Sur.

- BLV: Brisa ladera-valle
  Viento de regiones montañosas que sopla durante la noche ladera abajo por drenaje de aire más frio respecto al aire adyacente que está encuentra encima en la atmósfera libre.
- BVL: Brisa valle-ladera
  Viento de regiones montañosas que sopla durante el día ladera arriba por ascenso de aire más cálido respecto al aire adyacente que está encuentra por encima en la atmósfera libre.
- BTM: Brisa tierra-mar
  Viento de las regiones costeras que sopla durante la noche desde tierra hacia una extensión grande de agua, debido al enfriamiento nocturno del suelo.
- BMT: Brisa mar a tierra
  Viento de las regiones costeras que sopla desde el mar hacia una extensión grande de tierra, debido al calentamiento diurno del suelo.

5.2.1.3 Definiciones de condiciones y parámetros meteorológicos de escala local

Las definiciones para las configuraciones y parámetros meteorológicos a escala local[67] son:

- ITR: Inversión térmica radiativa

Capa de aire relativamente fría, generalmente adyacente a la superficie del suelo, enfriada por pérdida neta de radiación, en la que temperatura del aire aumenta con la altura.

- Wd: Dirección del viento en superficie

El viento medido en una estación de observación de superficie y que viene desde una dirección determinada.

- Ws: Magnitud del viento en superficie

Relación entre la distancia recorrida por el aire y el tiempo que tarda en recorrerla.

- PA: Presión atmosférica

Presión (fuerza por unidad de área) ejercida por la atmósfera sobre cualquier superficie en virtud de su peso. Equivale al peso de una columna de aire de sección transversal unitaria que se extiende desde un nivel dado hasta el límite superior de la atmósfera.

- TS: Temperatura en superficie

Temperatura del aire cerca de la superficie de la tierra

- HR: Humedad relativa en superficie

[67]Definiciones American Meteorological Society (AMS) https://glossary.ametsoc.org/
Glosario Organización Meteorológica Mundial https://unterm.un.org/

Relación porcentual a una presión y temperatura determinadas, entre el peso molecular en gramos del vapor de agua y el peso molecular en gramos que el aire tendría si estuviese saturado de agua a la misma presión y temperatura.

- GTV: Gradiente vertical de temperatura

Disminución de la temperatura del aire en grados Celsius por cada 100 metros de aumento de la altura. Inversión térmica: Capa atmosférica en la que la temperatura aumenta o permanece constante con la altura

- RS: Radiación solar

El total de radiación electromagnética emitida por el sol

- RA: Lluvia

Precipitación de agua líquida

5.2.2 Metodología

5.2.3 Identificación y clasificación de Configuraciones sinópticas y mesosescala

Se utilizó una base de datos robusta de elaboración propia a fin de analizar y determinar las configuraciones de escala sinópticas y de mesoescala que se presentaron diariamente durante los años 2016 al 2019. Esto se realizó a través del juicio experto del equipo consultor, quienes cuentan con amplia experiencia en meteorología sinóptica y meteorología aplicada a calidad del aire (Ver Anexos).

Se consideró en el análisis la configuración meteorológica que prevaleció en el día, por lo que no necesariamente coinciden con el perfil vertical del sonda de SCSN 12 UTC. Esto significa, por ejemplo, que, de presentarse un sistema frontal después de esa hora, el día quedará caracterizado por la incursión del sistema frontal.

5.2.4 Uso de Boxplot para identificar parámetros significativos del radiosonda en las distintas configuraciones sinópticas

Se agruparon los datos de las configuraciones sinópticas y los distintos parámetros de superficie y altura registrados por el radiosonda de Santo Domingo. El resultado de esta agrupación se presenta en diagramas de cajas (boxplot). Como se mencionó en el capítulo anterior, los extremos de cada caja corresponden a los percentiles 25 y 75 (rango intercuartil), la mediana corresponde al percentil 50 y se representa con una línea dentro de cada caja y en los extremos inferiores y superiores de los valores, no considerando outliers, se grafican los bigotes[68].

[68]Referencias utilizadas para la metodología de boxplot:Wilks, D. S. (2011). Statistical methods in the atmospheric sciences (Vol. 100). Academicpress.

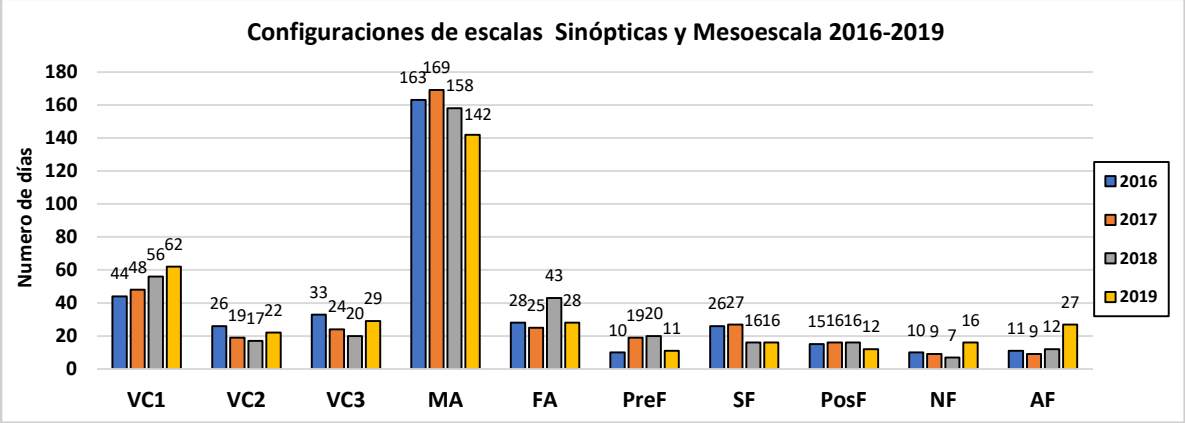
5.3 Resultados de configuraciones sinópticas y de mesoescala

5.3.1 Configuraciones sinópticas y mesoescala en la zona de estudio para todo el periodo

Las figuras siguientes presentan la distribución de las distintas configuraciones sinópticas considerando número de días para cada año y el porcentaje para todo el periodo 2016-2019

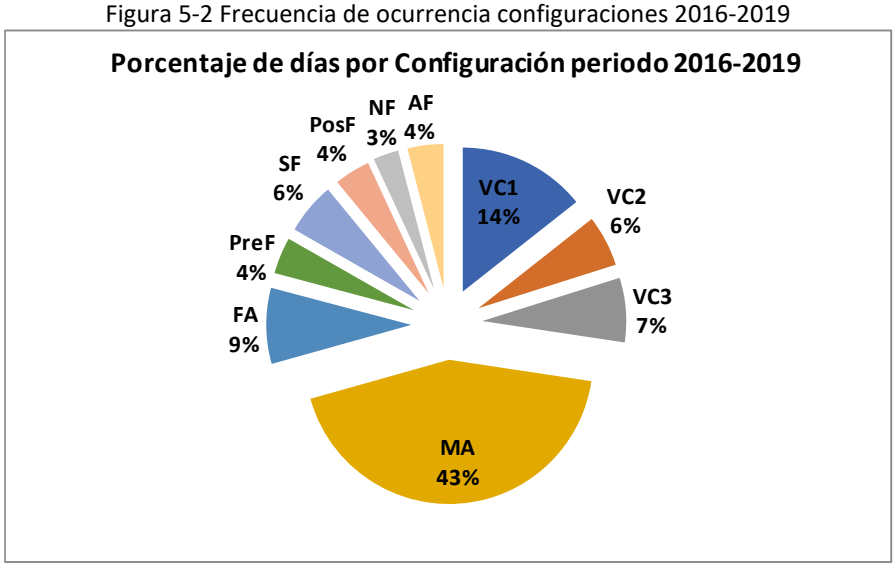
La Figura 5-1 y la Figura 5-2 muestran para la zona de estudio, la amplia prevalencia del Anticiclón Semipermanente del Pacífico Sur-Oriental(MA) (43%), seguido de las vaguadas costeras en sus tres etapas de evolución (VC1, VC2, VC3), frentes en altura (FA), sistemas frontales (SF), condiciones prefrontales (PreF), postfrontales (PosF), núcleos fríos (NF) y altas frías (AF).

Figura 5-1 Configuraciones de escala sinóptica y mesoescala



Fuente: Elaboración propia con análisis de configuraciones

Figura 5-2 Frecuencia de ocurrencia configuraciones 2016-2019

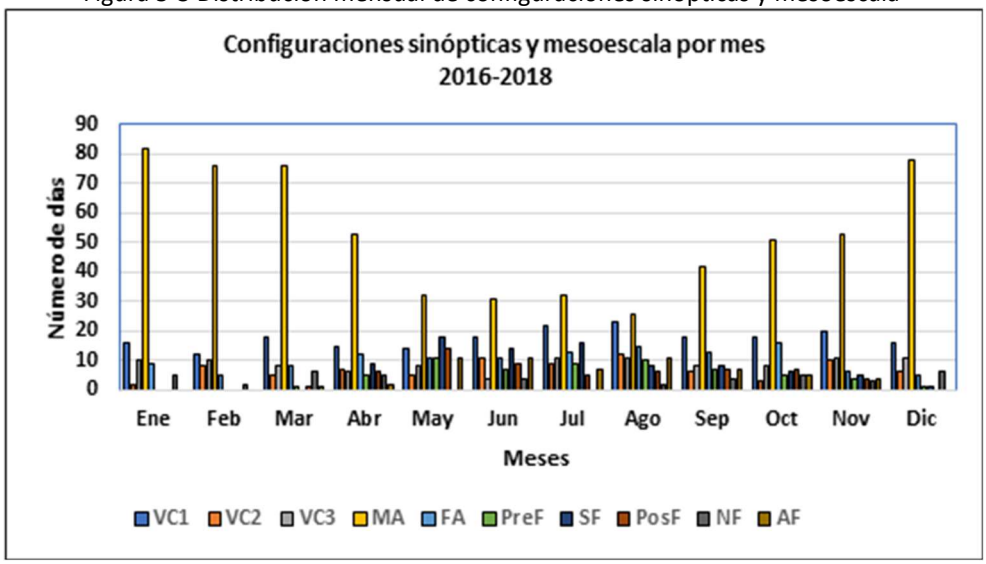


Fuente: Elaboración propia con análisis de configuraciones

5.3.2 Distribución mensual de Configuraciones sinópticas y mesoescala en la zona de estudio

Consistente con lo esperado, la Figura 5-3 muestra una significativa mayor cantidad de días asociada al anticiclón semipermanente del Pacífico (MA) en el periodo cálido (octubre-marzo), en tanto en el periodo frío (abril-septiembre) el número de casos asociados al MA disminuye y aunque continúa siendo el rasgo predominante, se observa una mayor alternancia con otras configuraciones sinópticas y de mesoescala.

Figura 5-3 Distribución mensual de configuraciones sinópticas y mesoescala



Fuente: Elaboración propia con análisis de configuraciones

En la tabla siguiente se muestra el detalle de la distribución mensual para el periodo 2016-2019:

Tabla 5-1 Distribución mensual de configuraciones de escala sinóptica y mesoescala en el periodo 2016-2019

Configuraciones sinópticas y mesoescala 2016-2019												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
VC1	16	12	18	15	14	18	22	23	18	18	20	16
VC2	2	8	5	7	5	11	9	12	6	3	10	6
VC3	10	10	8	6	8	4	11	11	8	8	11	11
MA	82	76	76	53	32	31	32	26	42	51	53	78
FA	9	5	8	12	11	11	13	15	13	16	6	5
PreF	0	0	1	5	11	7	9	10	7	5	4	1
SF	0	0	0	9	18	14	16	8	8	6	5	1
PosF	0	0	1	6	14	9	5	6	7	7	4	0
NF	5	2	6	5	0	4	0	2	4	5	3	6
AF	0	0	1	2	11	11	7	11	7	5	4	0
	124	113	124	120	124	120	124	124	120	124	120	124

Fuente: Elaboración propia con análisis de configuraciones

5.3.3 Parámetros de superficie y altura asociados a las distintas configuraciones

En el análisis anterior, se mostró la relevancia que tienen las distintas etapas de evolución de las vaguadas costeras en las condiciones de estabilidad regional y local.

Sobre la base de estos resultados, a continuación, se analiza mediante Boxplot otros niveles y parámetros de superficie y altura obtenidos del radiosonda de Santo Domingo, con la finalidad de ver si también se presentan rangos de valores diferenciadores entre las configuraciones sinópticas.

Los parámetros considerados son: Presión, Temperatura y Humedad Relativa en Superficie, Temperatura y Humedad Relativa a 925 hPa y 850 hPa, Altura geopotencial y Humedad Relativa en 500 hPa y Espesor 1000-500 hPa.

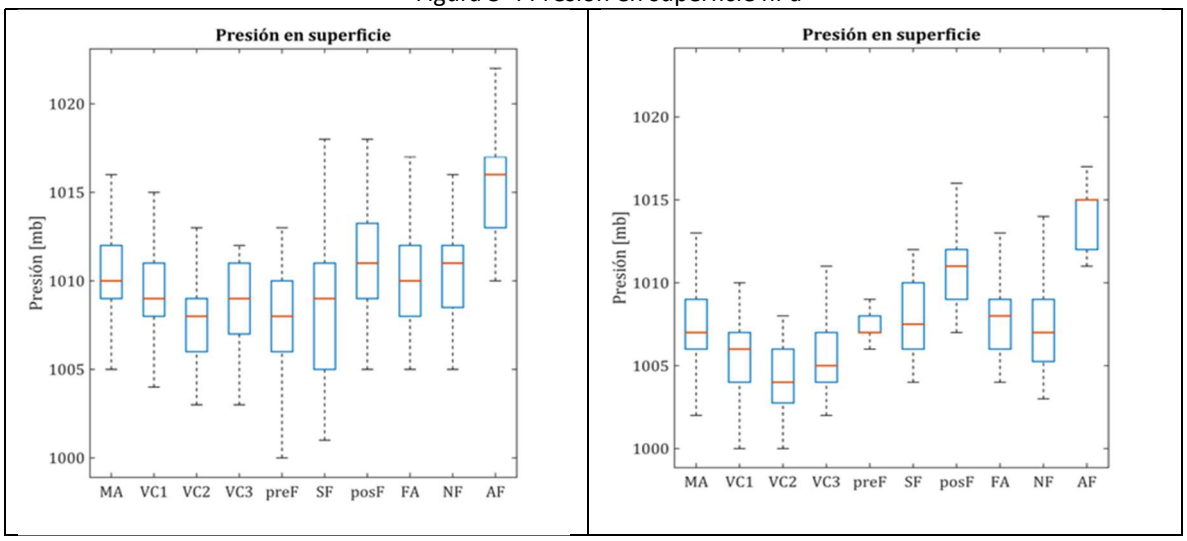
5.3.3.1 Presión en superficie (1000 hPa)

En la Figura 5-4 correspondiente a la presión en superficie _ (periodo frio, abril-septiembre a la izquierda/cálido, octubre-marzo a la derecha) _ se observa que los valores asociados a las fases de formación (VC1), culminación (VC2) y disipación de vaguadas costeras (VC3) muestran, en general, valores menores de presión respecto a las otras configuraciones, particularmente en el periodo cálido.

La fase de culminación de las vaguadas costeras (VC2) presenta los valores más bajos, lo que se debería a que en esta fase se presenta el mínimo de presión en superficie.

Los mayores valores de presión se presentan en la configuración postfrontal (PosF) y Alta Fría (AF); esta última se diferencia notoriamente de las demás configuraciones tanto en el periodo frío como cálido.

Figura 5-4 Presión en superficie hPa



Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Radiosonda Santo Domingo

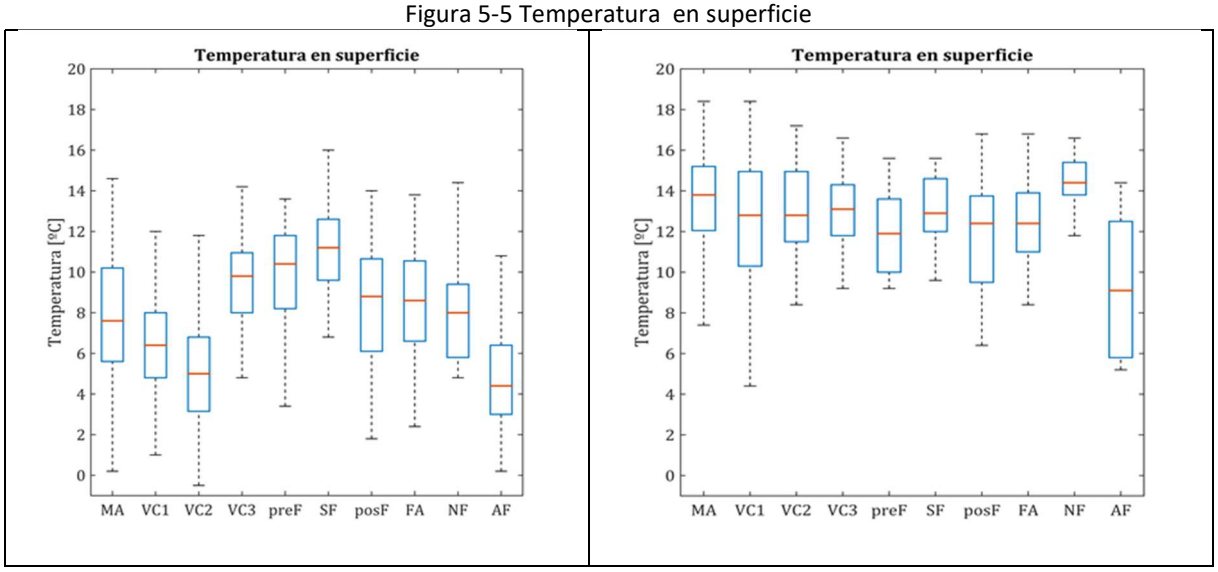
5.3.3.2 *Temperatura en superficie*

La Figura 5-5 correspondiente a la temperatura en superficie_ (periodo frio, abril-septiembre a la izquierda/cálido, octubre-marzo a la derecha) _ muestra que en el periodo frío los valores asociados a las fases de formación (VC1), culminación (VC2) de vaguadas costeras y la configuración de Alta Fría (AF), presentan las temperaturas más bajas. Esto se debería a que en las fases VC1 y VC2 se produce un significativo descenso de temperatura por perdida radiativa nocturna, debido a la prevalencia de cielos despejados y aire seco de componente Este En el caso de la alta fría (AF), también caracterizada por cielo despejado, se asociaría al enfriamiento nocturno adicional por perdida radiativa nocturna de una masa de aire normalmente fría y seca.

Las temperaturas más altas de las demás configuraciones, se debería, en buena medida, a que se caracterizan típicamente por cobertura nubosa, lo que disminuiría o impediría el enfriamiento radiativo nocturno

En el periodo cálido se observa que los valores de las medianas tienden a ser más altos y homogéneos, con excepción de la alta fría que presenta un valor significativamente más bajo, pero con una mayor dispersión de los datos respecto a las otras configuraciones.

Figura 5-5 Temperatura en superficie

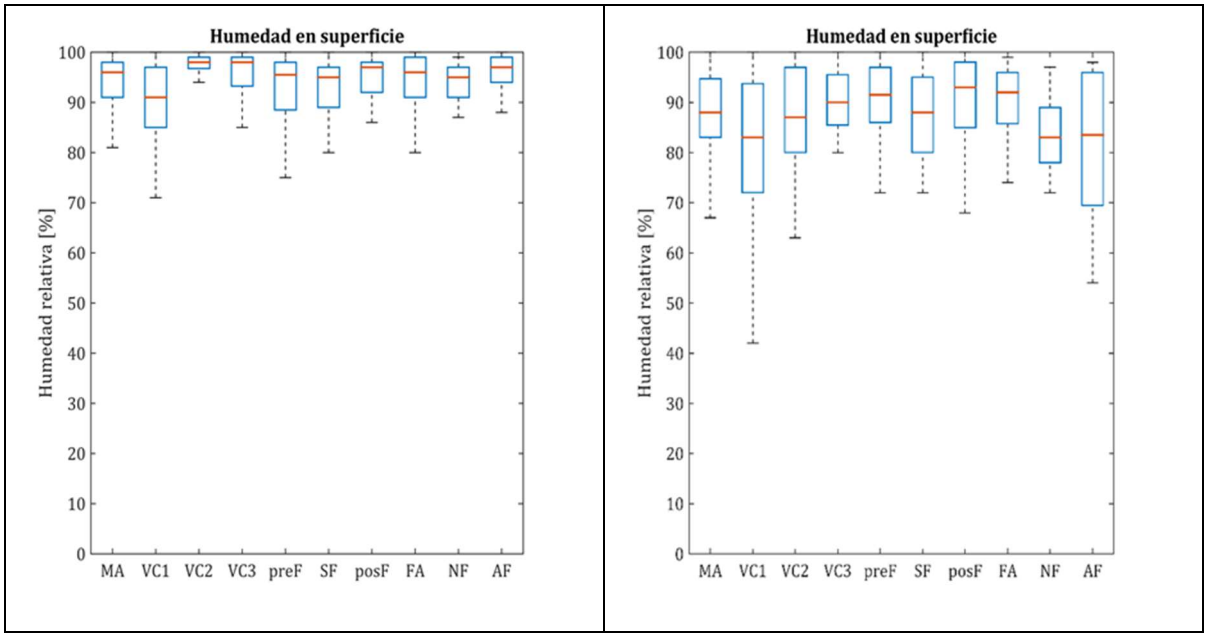


Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Radiosonda Santo Domingo

5.3.3.3 *Humedad relativa en superficie*

En la Figura 5-6 correspondiente a la humedad relativa en superficie_ (periodo frio, abril-septiembre a la izquierda/cálido, octubre-marzo a la derecha) _ destaca en el periodo frío los valores menores de humedad relativa de la configuración VC1, fase de formación de vaguada costera. Este hecho se debería a la advección de aire seco asociados a vientos de componente Este, en tanto en las demás configuraciones se observan diferencias menores de los valores de las medianas. En el periodo cálido los valores de humedad relativa son más bajos que en el periodo frio y presentan una mayor dispersión. Las configuraciones que muestra los valores menores de humedad relativa respecto a las medianas, corresponden a la fase de formación de las bajas costeras VC1, alta fría (AF) y núcleo frío (NF).

Figura 5-6 Humedad relativa en superficie

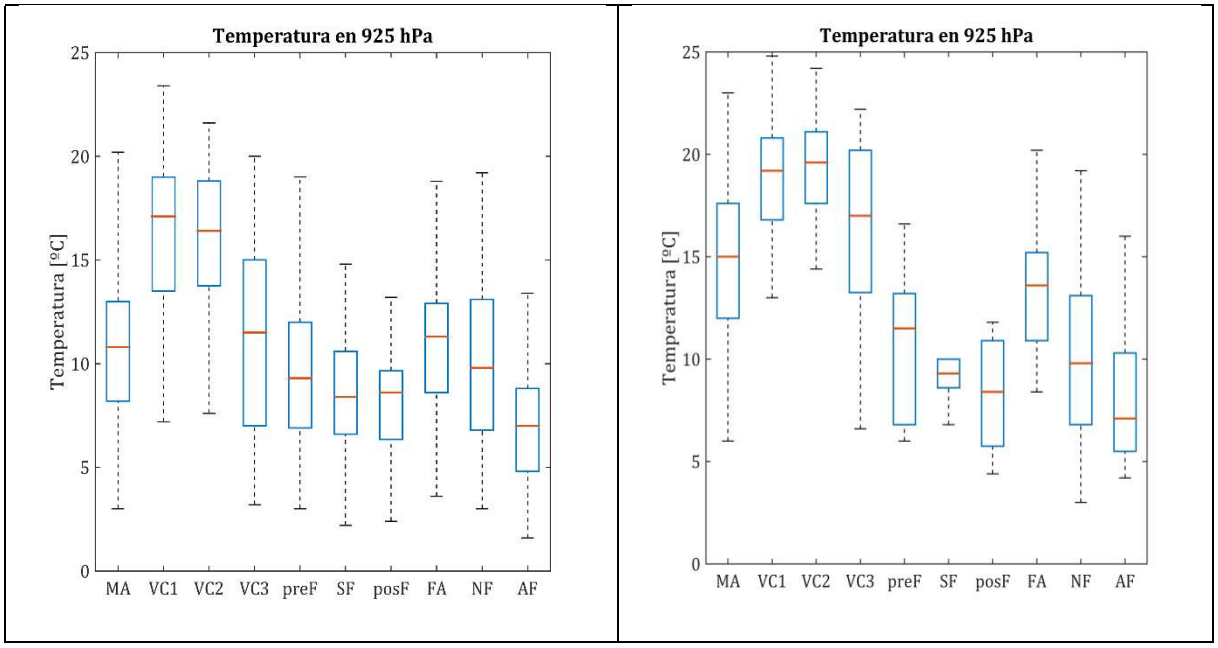


Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Radiosonda Santo Domingo

5.3.3.4 *Temperatura en 925 hPa*

La Figura 5-7 correspondiente a la temperatura en 925 hPa_ (periodo frío a la derecha/cálido a la izquierda) _ destaca que el rango intercuartil y las medianas de las temperaturas asociadas a las fases de formación (VC1) y culminación (VC2) de las vaguadas costeras se diferencian explícitamente de los valores que se presentan en las otras configuraciones. La fase de disipación (VC3) muestra una mayor dispersión y una mediana más baja, lo que se explicaría por un número de días en que el ascenso de la base de la inversión de subsidencia sobrepasó el nivel de 925 hPa, que se encuentra a una altitud media de aproximadamente 800 m s.n.m. Como es esperable, las temperaturas son mayores en el periodo cálido donde se presenta en general, una menor dispersión de los datos en las distintas configuraciones. Los valores menores corresponden a las configuraciones sistema frontal (SF), postfrontal (PosF) y alta fría (AF).

Figura 5-7 Temperatura en 925 hPa

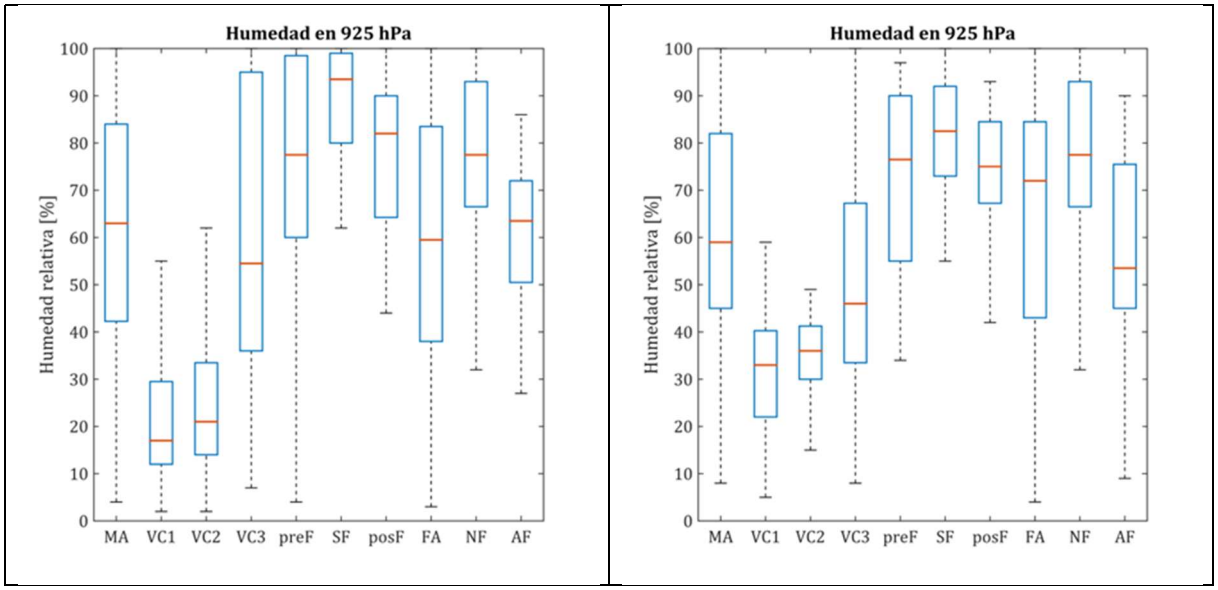


Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Radiosonda Santo Domingo

5.3.3.5 Humedad Relativa 925 hPa

Se observa en la Figura 5-8 correspondiente a la humedad relativa en 925 hPa_ (periodo frío (izquierda/cálido derecha) _ que el rango intercuartil y las medianas asociadas a las fases de formación (VC1) y culminación (VC2) de las vaguadas costeras, se diferencian notoriamente de los valores asociados a las otras configuraciones, particularmente en el periodo frío. La fase de disipación (VC3) de vaguada costera, muestra una marcada dispersión, lo que se explicaría por días en que el ascenso de la base de la inversión de subsidencia sobrepasó el nivel de 925 hPa. Los mayores valores de humedad relativa se observan en la configuración correspondiente al sistema frontal (SF).

Figura 5-8 Humedad relativa en 925 hPa



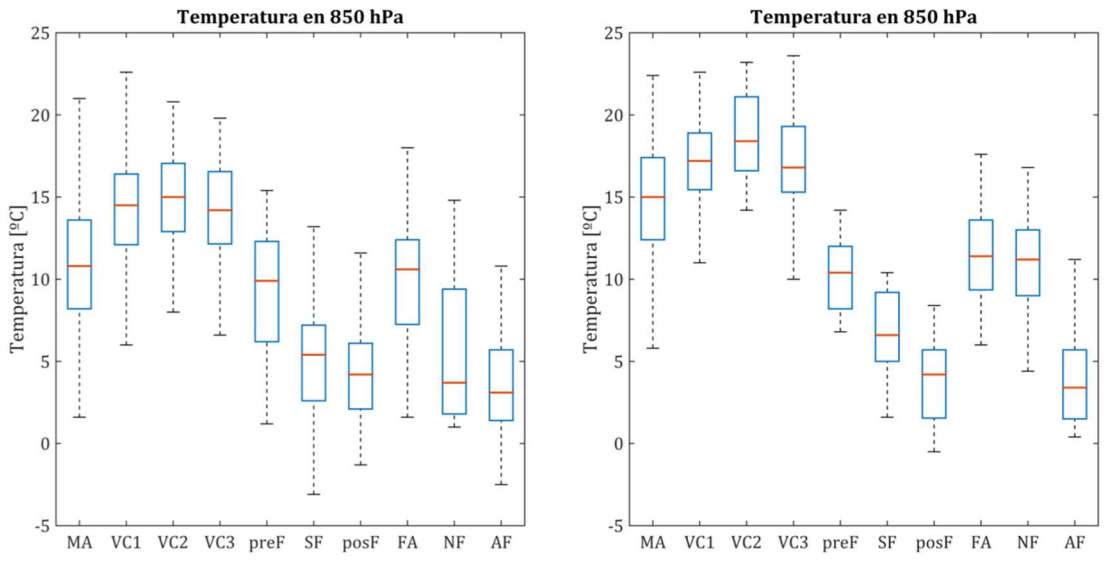
Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Radiosonda Santo Domingo

5.3.3.6 *Temperatura en 850 hPa*

La Figura 5-9 correspondiente a la temperatura en 850 hPa_ (periodo frio izquierda y cálido derecha) _muestra que el rango intercuartil y las medianas asociadas a las fases de formación (VC1), culminación (VC2) y disipación (VC3) de las vaguadas costeras, se diferencian de los valores que se alcanzan en las otras configuraciones. Como es esperable, las temperaturas son mayores en el periodo cálido donde se presenta, además, en general una menor dispersión en las distintas configuraciones respecto al periodo frio. Se aprecia por otra parte, que algunos valores ubicados en el primer cuartil de la vaguada costera se traslapan con valores ubicados en el tercer cuartil de la configuración correspondiente a la Alta Subtropical de Pacífico Sur Oriental (MA).

Los valores de las otras configuraciones en general son menores y en orden descendente corresponden a: Frente en altura (FA), prefrontal (PreF), sistema frontal (SF), postfrontal (PosF) y alta fría (AF). El núcleo frio (NF) o baja segregada en altura, muestra un comportamiento diferente, con valores comparables a la alta fría (AF) en el periodo frío y al frente en altura (FA) en el periodo cálido.

Figura 5-9 Temperatura en 850 hPa

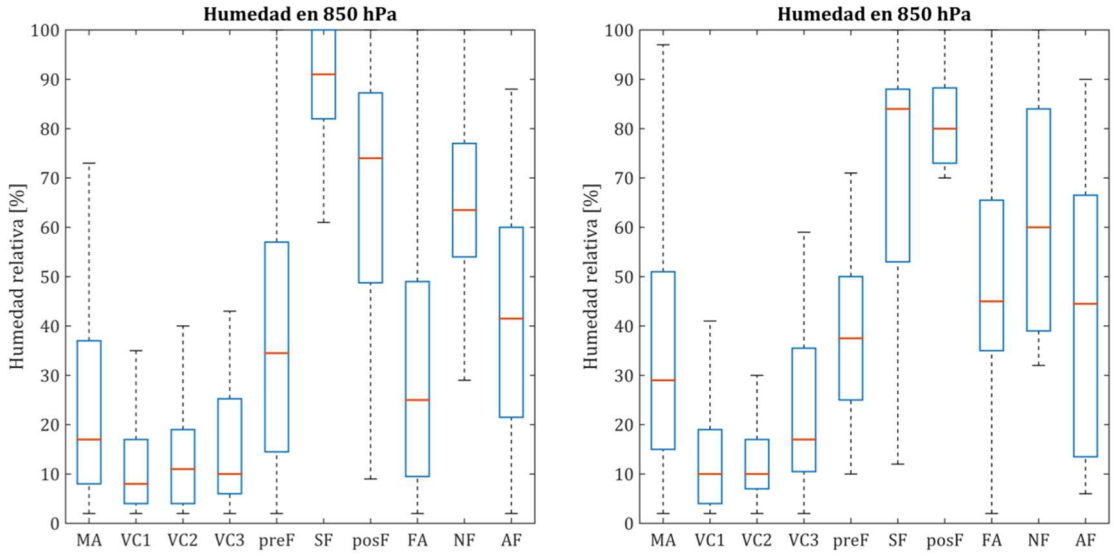


Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Radiosonda Santo Domingo

5.3.3.7 Humedad relativa en 850 hPa

La Figura 5-10correspondiente a la humedad relativa en 850 hPa_ (periodo frio izquierda y cálido derecha) _muestra que el rango intercuartil y las medianas asociadas a las fases de formación (VC1), culminación (VC2) y disipación (VC3) de las vaguadas costeras, muestran valores de humedad relativa menores que el resto de las configuraciones, en tanto los valores más altos se asocian al sistema frontal (SF) y Postfrontal (PosF).

Figura 5-10 Humedad relativa en 850 hPa



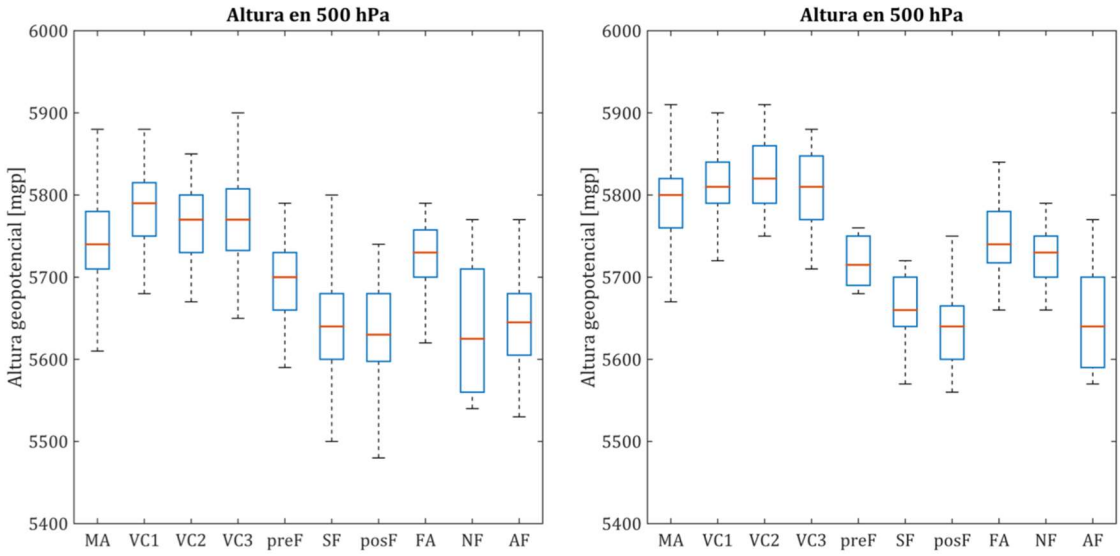
Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Radiosonda Santo Domingo

5.3.3.8 Altura geopotencial 500 hPa

Se observa en la Figura 5-11 correspondiente a la altura geopotencial de 500 hPa_ (periodo frío izquierda/cálido derecha) _ que el rango intercuartil y las medianas asociadas a las fases de formación (VC1), culminación (VC2) y disipación (VC3) de las vaguadas costeras, se diferencian de la mayoría de las otras configuraciones. Valores del primer cuartil de las tres fases de evolución de las vaguadas costeras, se traslapan con valores del tercer cuartil la Alta Subtropical de Pacífico Sur Oriental (MA). En el periodo cálido se observa una menor dispersión de los valores de las configuraciones en comparación con el periodo frío.

Los valores de las otras configuraciones en general son menores y en orden descendente corresponden a: Frente en altura (FA), prefrontal (PreF), alta fría (AF), sistema frontal (SF) y postfrontal (PosF). El núcleo frio (NF) o baja segregada en altura, muestra un comportamiento diferente, con valores comparables al postfrontal (PosF) en el periodo frío y al frente en altura (FA) en el periodo cálido.

Figura 5-11 Altura geopotencial en 500 hPa



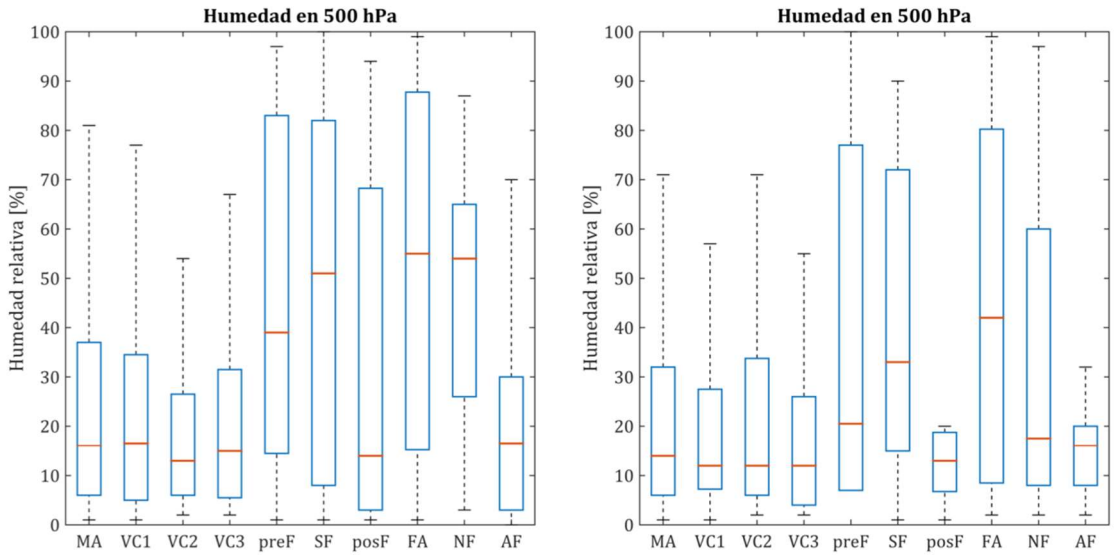
Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Radiosonda Santo Domingo

5.3.3.9 Humedad relativa en 500 hPa

La Figura 5-12 correspondiente a la humedad relativa en 500 hPa_ (periodo frio izquierda y cálido derecha) _muestra que las configuraciones que presentan los menores valores de humedad relativa en la troposfera media son la alta del Pacífico (MA), las tres fases de evolución de las vaguadas costeras (VC1), (VC2) y (VC3), la alta fría (AF) y el postfrontal (PosF); este último con una alta dispersión de los datos en el periodo frío y baja en el periodo cálido. Los valores de humedad más altos se observan en las configuraciones prefrontal (PreF), sistema frontal (SF) y frente en altura (FA), asociados a una alta dispersión de los datos.

Los más bajos valores de humedad relativa están asociados al Anticiclón Semipermanente del Pacífico y a las tres fases en la evolución de las vaguadas costeras VC1, VC2 y VC3, lo que se debería al proceso de subsidencia, calentamiento y disminución de la humedad por compresión adiabática. En los casos de la alta fría (AF) y postfrontal (PosF) los bajos valores de humedad relativa se relacionarían con las características que tienen las masas de aire frío y seco que irrumpen después del paso de los sistemas frontales.

Figura 5-12 Humedad relativa en 500 hPa



Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Radiosonda Santo Domingo

5.3.3.10 Espesor 1000-500 hPa

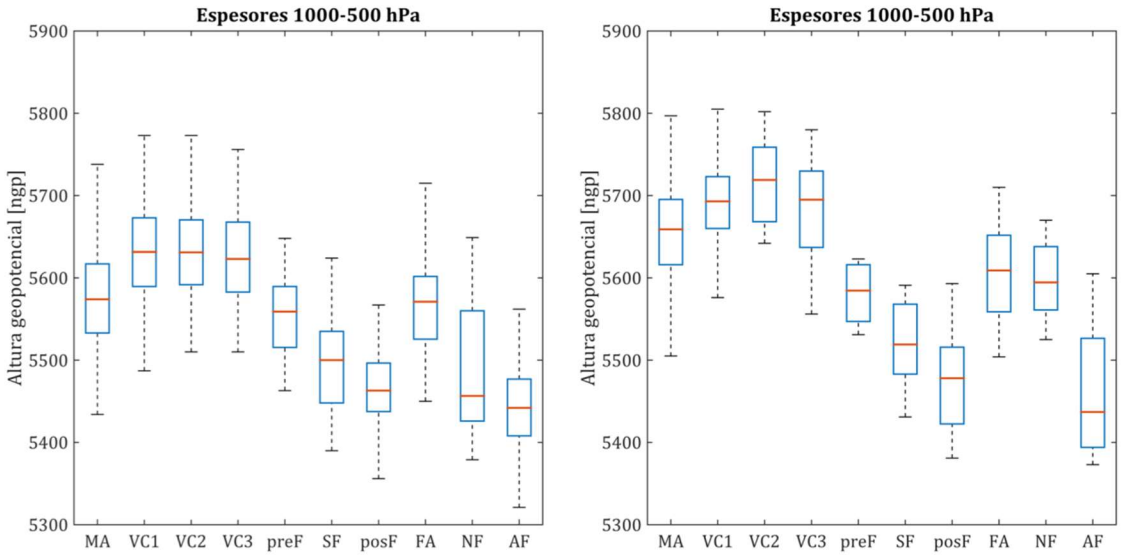
La Figura 5-13 correspondiente al espesor 1000 a 500 hPa_ (periodo frio, izquierda/cálido, derecha) _ muestra que el rango intercuartil y las medianas asociadas a las fases de formación (VC1), culminación (VC2) y disipación (VC3) de las vaguadas costeras se diferencian de los valores que alcanzan las otras configuraciones.

Los valores del espesor 1000 a 500 hPa, como es esperable, son mayores en el periodo cálido en las distintas configuraciones y además presentan una menor dispersión respecto al periodo frío.

Se aprecia por otra parte que algunos rangos de valores ubicados en el primer cuartil de la vaguada costera en sus tres etapas de evolución se traslapan con valores ubicados en el tercer cuartil de la configuración asociada a la Alta Subtropical de Pacífico Sur Oriental (MA).

La configuración de alta fría (AF) muestra los valores menores respecto a la mediana, diferenciándose de las demás configuraciones.

Figura 5-13 Espesor 1000-500 hPa



Fuente: Elaboración propia con datos de Configuraciones y Radiosonda Santo Domingo

Conclusiones: Consistente con los resultados de la estabilidad regional y de los análisis efectuados mediante el método estadístico boxplot, se corrobora que las fases de formación (VC1) y culminación (VC2) de bajas o vaguadas costeras, muestran rangos de valores diferenciados respecto a las otras configuraciones, para parámetros como temperatura, humedad relativa y altura geopotencial. Lo anterior referido a los valores ubicados entre los percentiles 25 y 75 de cada configuración. Esto fortalece la señal respecto a que este fenómeno de mesoescala se asociaría a una marcada subsidencia, descenso de la base de la inversión térmica y malas condiciones de ventilación.

La alta fría (FA) en niveles como presión en superficie, espesor 1000-500 hPa y temperatura en 925 hPa, también presenta valores diferenciadores respecto a las demás configuraciones.

El anticiclón semipermanente del Pacífico Sur-Oriental (MA) con relación a la temperatura y humedad relativa en 925 y 850, altura geopotencial y humedad relativa en 500 hPa y espesor 1000-500 hPa, muestra subsidencia de gran escala, estabilidad a niveles bajos y condiciones medias de ventilación regulares a malas.

La alta fría (FA) en niveles como presión en superficie, espesor 1000-500 hPa y temperatura en 925 hPa, también presenta valores diferenciados respecto a las demás configuraciones. Como se ha citado en capítulos anteriores, la incursión de altas frías (AF), típicamente genera malas condiciones de ventilación y de remoción de contaminantes en el periodo nocturno, al favorecer la formación de inversiones térmicas radiativas (ITR). Este tipo de inversión presenta una alta frecuencia de ocurrencia en la zona de estudio estando presente en la mayoría de los episodios registrados en la estación de monitoreo de Quintero.

5.3.4 Concentraciones horarias de SO_2≥500 µg/m³N y SO_2≥350 µg/m³N

Las condiciones meteorológicas de escala sinóptica que se presentan en la Zona Central modulan las condiciones de mesoescala y escala local, afectando a todas las estaciones ubicadas en la zona de estudio. Se eligieron las estaciones de Los Maitenes en Puchuncaví, Quintero en Quintero y Concón en Concón por ser las que presentan en el periodo de estudio 2016-2019 las mayores concentraciones de SO_2 en cada una de las comunas y para efectos de pronóstico de calidad de aire representarían la peor condición esperable en términos de concentraciones.

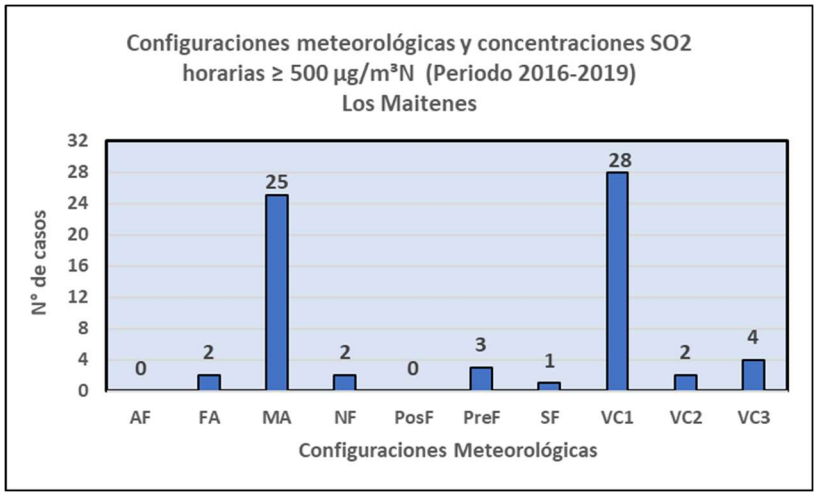
Se eligió el valor de SO_2≥500 µg/m³N por representar el nivel de Alerta de acuerdo con la nueva norma vigente y se incluye, además, los días de superación de la Norma SO_2≥ 350 µg/m³N y menor al nivel de Alerta, para analizarlas similitudes y diferencias que pudieran tener en su comportamiento.

El que, para una configuración sinóptica, por ejemplo, el Anticiclón Semipermanente del Pacífico Suroriental (MA), en una estación de monitoreo se haya registrado en el periodo de estudio un número determinado de excedencias de SO_2 ≥ 500 µg/m³N, no significa que cada vez que se presente esta configuración se alcanzará el nivel de Alerta; lo que también es válido para las configuraciones en que se superó la Norma.

Dependerá entre otros factores, de la intensidad con que se presente la configuración, principalmente en términos de altura de la base de la inversión, viento medio dentro de la capa de mezcla y del volumen de las emisiones, en este caso de SO_2.

La Figura 5-14 muestra que la configuración asociada a mayor número de casos de concentraciones de SO_2≥ 500 µg/m³N en Los Maitenes es el de formación de vaguada costera (VC1) seguida de la acción del Anticiclón Semipermanente del Pacífico Sur-oriental (MA).

Figura 5-14 Configuraciones meteorológicas asociadas a concentraciones horarias $SO_2 \geq 500$ µg/m³N en Los Maitenes

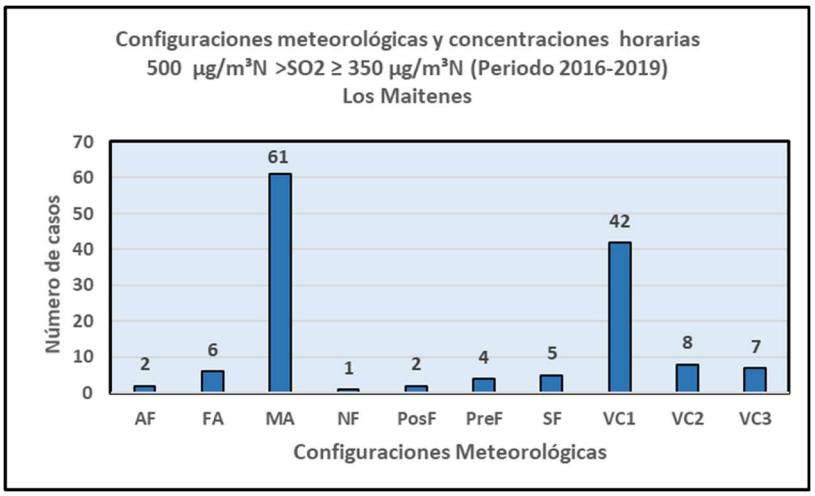


Fuente: Elaboración propia con análisis de configuraciones y datos estaciones MMA

Se observa en la Figura 5-15 que la configuración asociada a mayor número de casos de concentraciones de $SO_2 \geq 350$ µg/m³N y menores a 500 µg/m³N en Los Maitenes, corresponde a la acción del Anticiclón Semipermanente del Pacífico Sur-oriental (MA), seguida de la formación de vaguada costera (VC1).

Al igual que en los días de superación del Nivel de Alerta, siguen destacando holgadamente estas dos configuraciones respecto a las otras, aunque el mayor número de casos, en una oportunidad esté asociado al Anticiclón del Pacífico (MA) y en la otra a la formación de vaguada costera. (VC1)

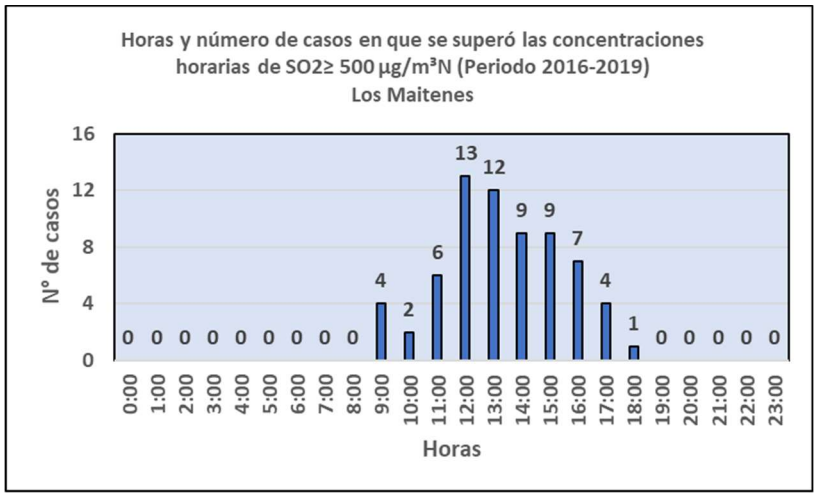
Figura 5-15 Configuraciones meteorológicas asociadas a concentraciones horarias 500 µg/m³N $> SO_2 \geq 350$ µg/m³N en Los Maitenes



Fuente: Elaboración propia con análisis de configuraciones y datos estaciones MMA

Se observa en la Figura 5-16 que en Los Maitenes, las excedencias respecto a concentraciones horarias de SO_2≥ 500 µg/m³N se registra entre las 09 y 18 horas, concentrándose principalmente entre el mediodía y las 16 horas, mientras que entre las 19 y 08 horas no se registran superaciones de nivel de Alerta.

Figura 5-16 Horas en que se superó las concentraciones horarias SO_2≥500 µg/m³N en Los Maitenes



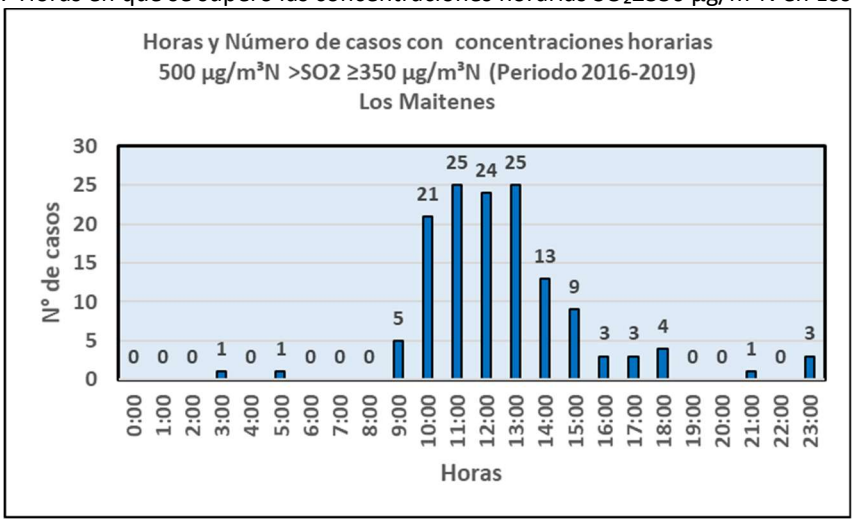
Fuente: Elaboración propia con datos estaciones MMA

La Figura 5-17 muestra que en Los Maitenes, las excedencias de la Norma respecto a concentraciones horarias de SO_2 se registran, al igual que en el caso del Nivel de Alerta, entre las 09:00 y 18:00 H.L. Sin embargo, el mayor número de casos en términos de superación de la Norma se presenta entre 10:00 y 13:00 H.L. y en el caso de las Alertas entre 12:00 y 15:00. Llama la atención que los mayores valores se registren en las primeras horas de la tarde cuando debiera haber un incremento del viento superficial y de la altura de la capa de mezcla. Las características del gradiente térmico vertical en la capa de mezcla, podría incidir en el comportamiento de la pluma de emisiones que impacta esta estación.[69]

Respecto a los casos de superación de la Norma, a diferencia de los analizados en el Nivel de Alerta, se observan algunos casos muy aislados y excepcionales en la noche y madrugada, que podrían deberse a procesos probablemente complejos de recirculación del SO_2.

[69] Bossi M., Matich D., Pignani J.M., Contaminación, Meteorología y Estabilidad Térmica. 2000

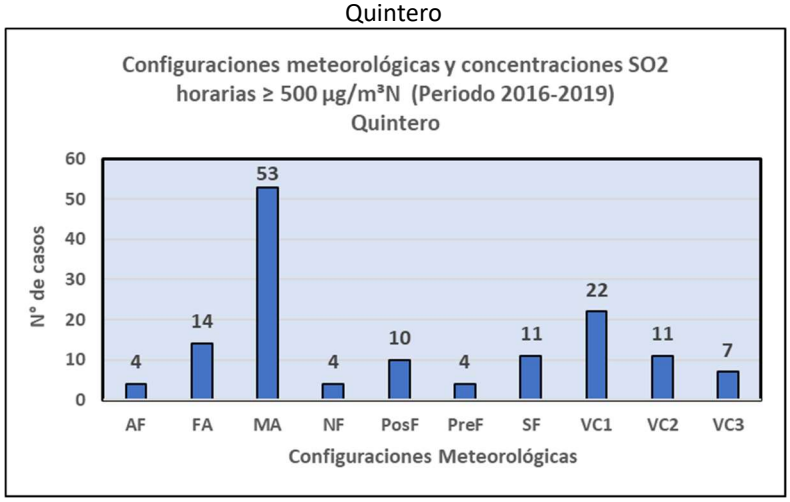
Figura 5-17 Horas en que se superó las concentraciones horarias SO_2≥350 µg/m³N en Los Maitenes



Fuente: Elaboración propia con datos estaciones MMA

La Figura 5-18 destaca que la configuración asociada a mayor número de casos de concentraciones de SO_2≥ 500 µg/m³N en Quintero es el Anticiclón Semipermanente del Pacífico Sur-oriental (MA) seguido de la etapa de formación de vaguada costera (VC1).

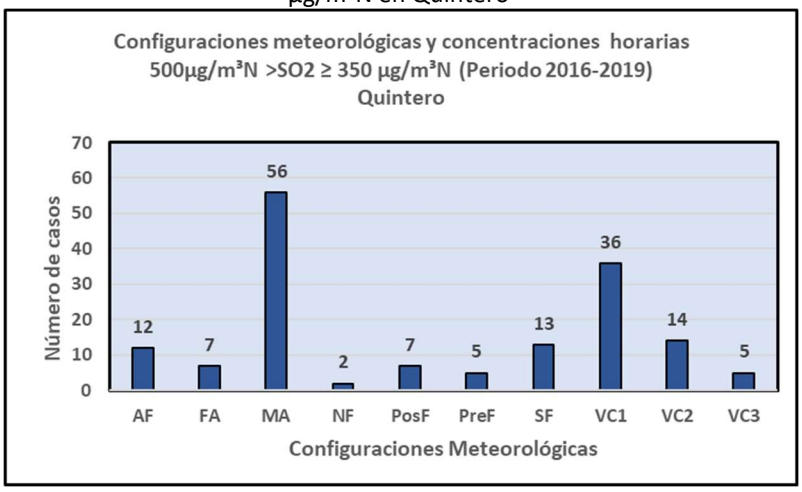
Figura 5-18 Configuraciones meteorológicas asociadas a concentraciones horarias SO_2 ≥ 500 µg/m³N en Quintero



Fuente: Elaboración propia con análisis de configuraciones y datos estaciones MMA

La Figura 5-19 muestra que la configuración asociada a mayor número de casos de concentraciones de SO_2≥ 350 µg/m³N y menor a 500 µg/m³N en Quintero, al igual que en el caso de los valores asociados al Nivel de Alerta, es el Anticiclón Semipermanente del Pacífico Sur-oriental (MA) seguido de la etapa de formación de vaguada costera (VC1).

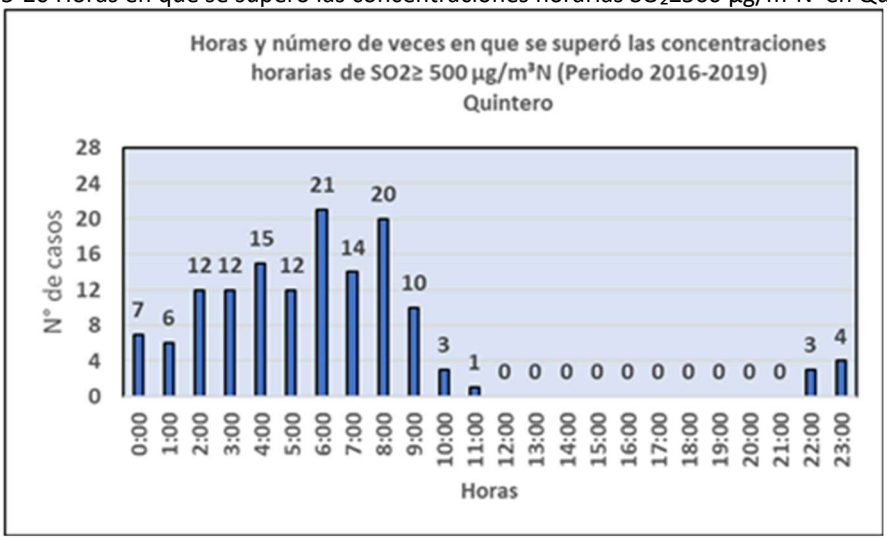
Figura 5-19 Configuraciones meteorológicas asociadas a concentraciones horarias 500 µg/m³N >SO_2 ≥ 350 µg/m³N en Quintero



Fuente: Elaboración propia con análisis de configuraciones y datos estaciones MMA

Se observa en la Figura 5-20 que en Quintero el mayor número de casos con concentraciones horarias de SO_2≥ 500 µg/m³N se produce en la noche, madrugada y primeras horas de la mañana, mientras que entre las 12 y 21 horas no se registran superaciones del Nivel de Alerta.

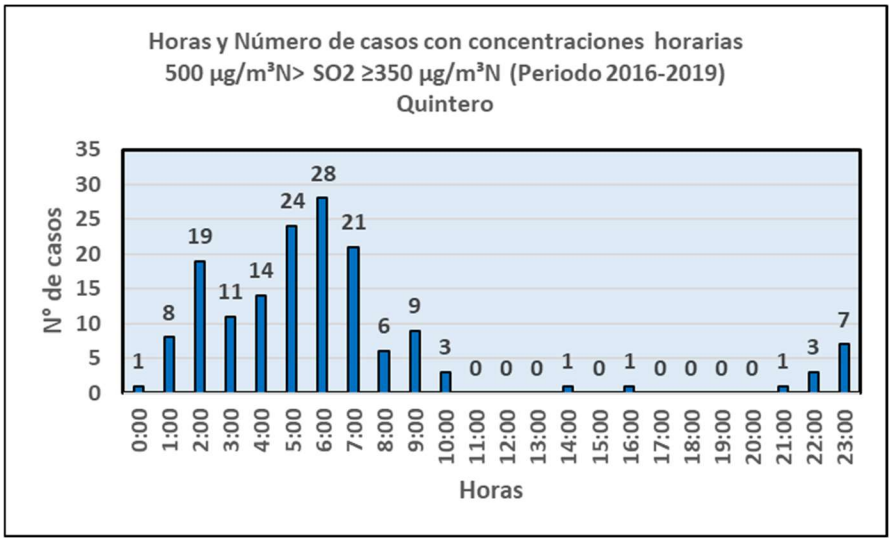
Figura 5-20 Horas en que se superó las concentraciones horarias SO_2≥500 µg/m³N en Quintero



Fuente: Elaboración propia con datos estaciones MMA

La Figura 5-21 destaca que en Quintero el mayor número de casos con concentraciones horarias de SO_2≥350 µg/m³N y menores a 350 µg/m³N se produce en la noche durante la noche hasta las primeras horas de la mañana. Entre las 11 y 20 horas típicamente no se registran superaciones del rango comprendido entre el Nivel de la norma y el Nivel de Alerta, con excepción de dos casos atípicos en el periodo de estudio y que se habrían registrado a las 14:00 y 16:00 respectivamente.

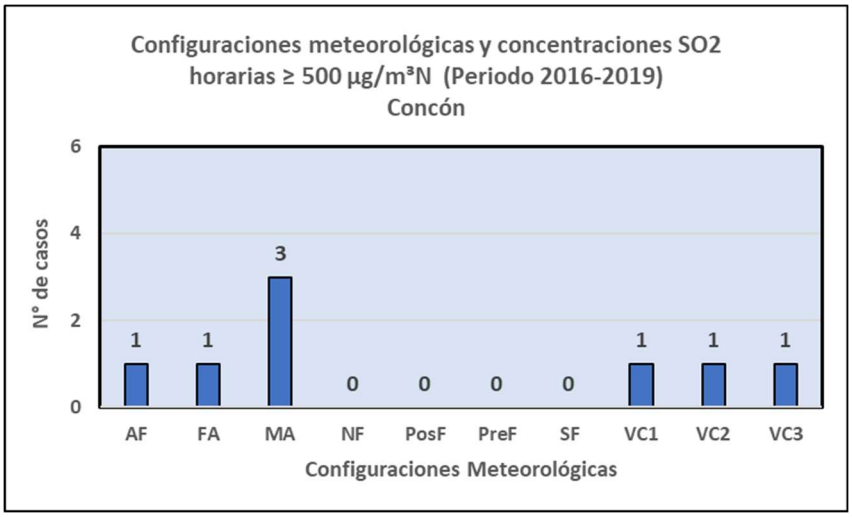
Figura 5-21 Horas en que se superó las concentraciones horarias SO_2≥500 µg/m³N en Quintero



Fuente: Elaboración propia con datos estaciones MMA

Se destaca en la Figura 5-22 que la estación de Concón presenta un número significativamente menor de casos de concentraciones de SO_2≥ 500 µg/m³N con respecto a Quintero y Puchuncaví. Los casos presentados se asocian principalmente a la acción del Anticiclón Semipermanente del Pacífico Sur-oriental (MA) con 3 casos, seguido con 1 caso por las etapas de formación, culminación y disipación de vaguada costera (VC1), (VC2) y (VC3); Alta fría (AF) y Frente en Altura (FA).

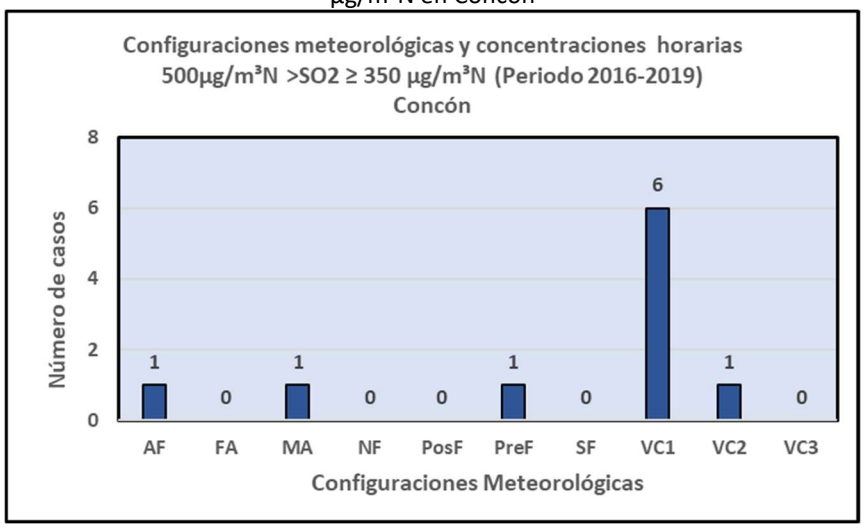
Figura 5-22 Configuraciones meteorológicas asociadas a concentraciones horarias SO_2 ≥ 500 µg/m³N en Concón



Fuente: Elaboración propia con análisis de configuraciones y datos estaciones MMA

Se destaca en la Figura 5-23 que la estación de Concón presenta un número significativamente menor de casos de concentraciones de SO_2≥ 350 µg/m³N y menores a 500 µg/m³N, en comparación a los registros de Quintero y Los Maitenes. En 6 de los 10 casos prevaleció la etapa de formación de vaguada costera (VC1), seguido con 1 caso cada una, las siguientes configuraciones: Culminación de vaguada costera (VC2), Alta Fría (FA), Anticiclón del Pacífico (MA) y Prefrontal (PreF).

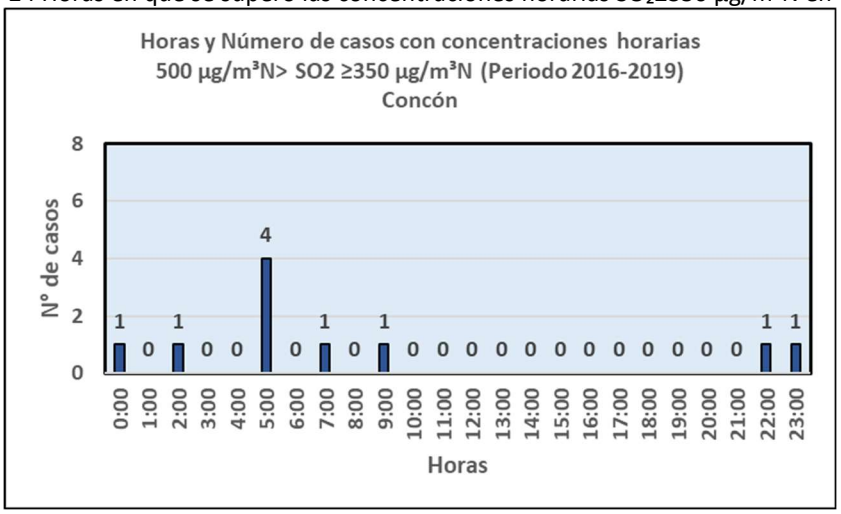
Figura 5-23 Configuraciones meteorológicas asociadas a concentraciones horarias 500 µg/m³N >SO_2 ≥ 350 µg/m³N en Concón



Fuente: Elaboración propia con análisis de configuraciones y datos estaciones MMA

La Figura 5-24 muestra que en Concón las concentraciones horarias de SO_2≥ 350 µg/m³N y menores a 500 µg/m³N, al igual que en el caso de Alertas, se presentan en horas de la noche hasta primeras horas de la mañana, periodo en que la estación de monitoreo se encuentra viento abajo de ENAP ubicada al ESE. En el día el viento rota hacia el Oeste Noroeste alejando las emisiones de la estación.

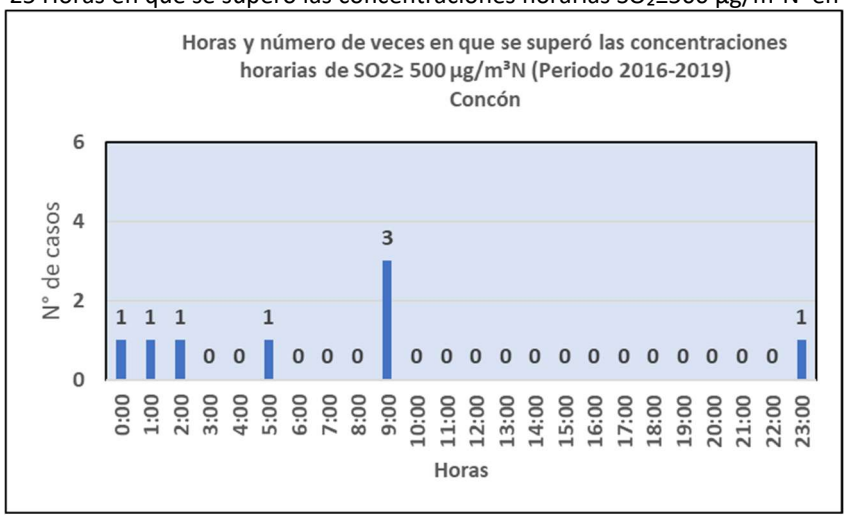
Figura 5-24 Horas en que se superó las concentraciones horarias SO_2≥350 µg/m³N en Concón



Fuente: Elaboración propia con datos estaciones MMA

Se observa en la Figura 5-25 que en Concón con los pocos casos disponibles con concentraciones horarias de SO_2≥ 500 µg/m³N, estos de presentarían en la madrugada y primeras horas de la mañana.

Figura 5-25 Horas en que se superó las concentraciones horarias SO_2≥500 µg/m³N en Concón



Fuente: Elaboración propia con datos estaciones MMA

Conclusión: Las tablas siguientes resumen los gráficos analizados de concentraciones de SO_2 y Configuraciones.

La Tabla 5-2 muestra que en el periodo 2016-2019 en la estación de monitoreo de Quintero se registró el mayor número de días con concentraciones horarias de SO_2 ≥500 µg/m³N, seguida de Los Maitenes; en tanto la configuración que presentó el mayor número de casos fue la Alta Semipermanente del Pacifico Suroriental (MA) seguido de la formación de vaguada costera (VC1).

Tabla 5-2 Configuraciones meteorológicas asociadas a concentraciones horarias ≥500 µg/m³N en el periodo 2016-2019 en Los Maitenes, Quintero y Concón

Estaciones Conf.Met	Los Maitenes	Quintero	Concón	N° Total
AF	0	4	1	5
FA	2	14	1	17
MA	25	53	3	81
NF	2	4	0	6
PosF	0	10	0	10
PreF	3	4	0	7
SF	1	11	0	12
VC1	28	22	1	51
VC2	2	11	1	14
VC3	4	7	1	12
N° Total	67	140	8	215

Fuente: Elaboración propia con datos Configuraciones y estaciones MMA

Se observa en la Tabla 5-3 que en el periodo 2016-2019 en la estación de monitoreo de Quintero se registró el mayor número de días con concentraciones horarias de SO_2 ≥350 µg/m³N y menores a 500 µg/m³N, seguida de Los Maitenes; en tanto al igual que para el nivel de Alerta, la configuración que presentó el mayor número de casos fue la Alta Semipermanente del Pacifico Suroriental (MA) seguido de la formación de vaguada costera (VC1).

Tabla 5-3 Configuraciones meteorológicas asociadas a concentraciones horarias ≥350 µg/m³N en el periodo 2016-2019 en Los Maitenes, Quintero y Concón

Estaciones Conf.Met	Los Maitenes	Quintero	Concón	N° Total
AF	2	12	1	15
FA	6	7	0	13
MA	61	56	1	118
NF	1	2	0	3
PosF	2	7	0	9
PreF	4	5	1	10
SF	5	13	0	18
VC1	42	36	6	84
VC2	8	14	1	23
VC3	7	5	0	12
N° Total	138	157	10	305

Fuente: Elaboración propia con datos Configuraciones y estaciones MMA

Se observa en la Tabla 5-4 que en Quintero y Concón las superaciones del nivel de Alerta se producen principalmente en la noche, madrugada y primeras horas de la mañana, en tanto en Los Maitenes el mayor número de casos se registra alrededor del mediodía.

Tabla 5-4 Horas del día y número de veces en que se superó el nivel de Alerta ≥500 µg/m³N en el periodo 2016-2019 en Los Maitenes, Quintero y Concón

Estaciones Hora del día	Los Maitenes	Quintero	Concón	N° Total
0		7	1	8
1		6	1	7
2		12	1	13
3		12		12
4		15		15
5		12	1	13
6		21		21
7		14		14
8		20		20
9	4	10	3	17
10	2	3		5
11	6	1		7
12	13			13
13	12			12
14	9			9
15	9			9
16	7			7
17	4			4
18	1			1
19				0
20				0
21				0
22		3		3
23		4	1	5
N° Total	67	140	8	215

Fuente: Elaboración propia con datos Configuraciones y estaciones MMA

La Tabla 5-5 muestra que en Quintero y Concón las superaciones del Nivel de la Norma horaria SO_2 ≥350 µg/m³N y menor a 500 µg/m³N, se produce principalmente en la noche y primeras horas de la mañana, en tanto en Los Maitenes el mayor número de casos se registra entre las 10:00 y 13:00 H.L.

Tabla 5-5 Horas del día y número de veces en que se superó el nivel de Alerta ≥500 µg/m³N en el periodo 2016-2019 en Los Maitenes, Quintero y Concón

Estaciones Hora del día	Los Maitenes	Quintero	Concón	N° Total
0	0	1	1	2
1	0	8	0	8
2	0	19	1	20
3	1	11	0	12
4	0	14	0	14

Estaciones Hora del día	Los Maitenes	Quintero	Concón	N° Total
5	1	24	4	29
6	0	28	0	28
7	0	21	1	22
8	0	6	0	6
9	5	9	1	15
10	21	3	0	24
11	25	0	0	25
12	24	0	0	24
13	25	0	0	25
14	13	1	0	14
15	9	0	0	9
16	3	1	0	4
17	3	0	0	3
18	4	0	0	4
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	1	1	0	2
22	0	3	1	4
23	3	7	1	11
N° Total	138	157	10	305

Fuente: Elaboración propia con datos Configuraciones y estaciones MMA

Conclusiones: Las configuraciones de escala sinóptica y mesoescala modulan las condiciones de estabilidad a escala local, incidiendo en la altura de la capa de mezcla, viento superficial y estabilidad a niveles bajos. Sin embargo las brisas nocturnas montaña- valle y tierra-mar; y diurna mar-tierra y valle-montaña muestran tener una incidencia determinante en la distribución espacial y temporal de los episodios de SO2.

En Los Maitenes las superaciones de la Norma y del nivel de Alerta por SO2, se registran en el día cuando esta estación queda ubicada viento abajo de las fuentes emisoras de contaminantes. La brisa diurna mar-tierra y valle montaña, determina en ese lugar vientos del OesteNoroeste, esto es desde conde están emplazado el Complejo Industrial Ventanas en término de las mayores Megafuentes.

En el periodo nocturno la brisa montaña-valle y tierra mar es de componente Este, quedando esta estación ubicada viento arriba de las Megafuentes, en cambio la estación de Quintero queda ubicada viento debajo de las fuentes emisoras de contaminantes y es impactada por las emisiones de SO2, pudiendo registrarse superaciones de la Norma y del Nivel de Alerta.

En Concón en el periodo nocturno la estación queda viento abajo de las fuentes emisoras ubicadas hacia el ESE, pudiendo registrarse superaciones de la Norma o Niveles de Alerta por SO2. En el día con la brisa mar-tierra el viento rota hacia el OesteNoroeste alejando las emisiones del lugar donde está emplazada la estación.

6 Producto v de BT: Identificación de las variables meteorológicas y su relación con la ocurrencia de eventos de incrementos de las concentraciones de contaminantes

El objetivo de este producto consiste en identificar el comportamiento específico de las variables que caracterizan los fenómenos analizados en los productos anteriores, estableciendo rangos de comportamiento y su grado de relación con la ocurrencia de eventos de contaminación o de incrementos en las concentraciones de contaminantes observados. Lo anterior con el objeto de prever su comportamiento o pronóstico, cuando sea factible.

6.1 Datos y métodos

Se considera la información analizada en los dos capítulos anteriores de este informe.

Se utiliza también la base de datos facilitada por el mandante, y posteriormente revisada por el equipo consultor, que contempla datos horarios de meteorología y calidad del aire (SO_2 y MP2,5) para la zona de estudio.

Se utilizan los datos del periodo 2016-2019 para confeccionar gráficos de comportamiento SO_2 en función del dT en la Torre, ciclos diarios y estacionales SO_2, rosas de concentración para SO_2 y MP2,5 y gráficos compuestos para SO_2 y MP2,5. También se elaboran mapas que apoyan el análisis de vientos en las distintas configuraciones meteorológicas.

Se mantienen las mismas estaciones analizadas en capítulos anteriores, Concón, Quintero y Los Maitenes, representativas de las zonas de Concón, Quintero y Puchuncaví.

6.2 Resultados identificación de variables meteorológicas

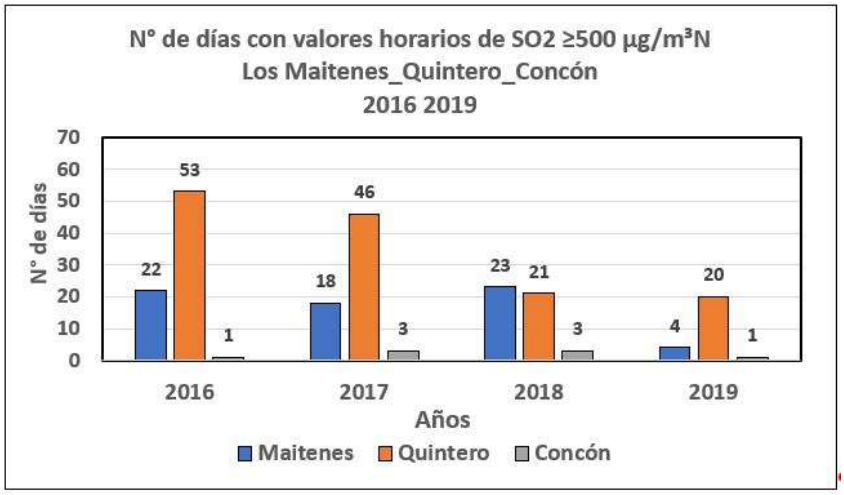
6.2.1 Estaciones con mayores concentraciones horarias de SO_2

Este punto es necesario para iniciar el análisis de las variables meteorológicas relacionadas con el incremente de las concentraciones. La Figura 6-1 muestra que la estación Quintero, con excepción de 2018, presenta en el periodo 2016-2019 el mayor número de días con concentraciones horarias de $SO_2 \geq 500$ µg/m³N, con una marcada disminución entre 2017 y 2018; para mantenerse después con un número de días similares de superación del Nivel de Alerta entre 2018 y 2019.
En Quintero se presentarían las condiciones medias de difusión de contaminantes más desfavorables entre las 3 estaciones, debido a que los episodios se registran en la noche, con una alta frecuencia de inversiones térmicas, radiativas principalmente en otoño-invierno. Por otra parte, en la noche la estación de monitoreo y comuna de Quintero quedan viento abajo de las Megafuentes emplazadas en la Comuna de Puchuncaví, y la circulación de vientos débiles de componente EsteNoreste asociados a la brisa tierra mar, que produce transporte de SO2 hacia Quintero.

Los Maitenes muestra entre 2016 y 2018 entre 18 y 23 días con valores horarios de SO_2≥500 µg/m³N, para en 2019 registrar una drástica disminución a 4 días. En esta estación las mayores concentraciones se registran en el periodo diurno hacia el mediodía y primeras horas de la tarde cuando se produciría un aumento del viento de componente OesteNoroeste y de la altura de la capa de mezcla.

Concón muestra entre 2016 y 2019 un muy reducido número de casos, entre 1 y 3 por año, sin una tendencia definida. En Concón si bien se producen en la noche, tenderían a ser menores, por una parte, porque el viento nocturno del ESE es del orden de 3 a 6 m/s y por otra parte porque sobre la base de los inventarios, las emisiones de SO2 de ENAP[70] serían significativamente menores que las de las Megafuentes emplazadas en Puchuncaví.

Figura 6-1 Número de días con valores horarios de SO_2 ≥500 µg/m³N, Los Maitenes, Quintero y Concón. 2016 a 2019

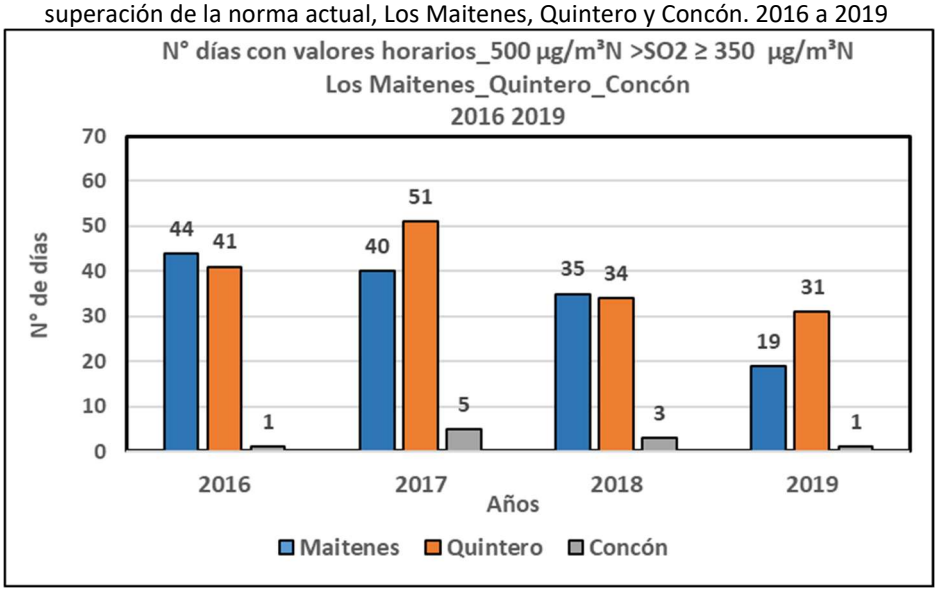


Fuente: Elaboración propia con datos estaciones MMA

La Figura 6-2 muestra el número de días en que en el periodo 2016-1019 se superó el nivel de la Norma SO_2≥350 µg/m³N, pero no alcanzó el nivel de Alerta SO_2≥500 µg/m³N. Se observa una gradual y sostenida disminución del número de días con superaciones de norma en Los Maitenes, en tanto en Quintero la mayor disminución se registró entre 2017 y 2018, tendiendo más bien a mantenerse en 2018 y 2019. Concón presenta un reducido número de casos con tendencia a la disminución de las concentraciones de SO2 a partir de 2017.

[70] Fuente: D.S. N° 138/05 MINSAL

Figura 6-2 Número de días con valores horarios de SO_2 ≥350 y menores a 500 µg/m³N, correspondiente a la superación de la norma actual, Los Maitenes, Quintero y Concón. 2016 a 2019



Fuente: Elaboración propia con datos estaciones MMA

6.2.2 Ciclos diarios promedios de SO_2

Para estudiar el comportamiento de las concentraciones de SO_2 durante un día promedio en las estaciones de Concón, Quintero y Los Maitenes se han elaborado para cada una de ellas 2 gráficos de ciclos diarios.

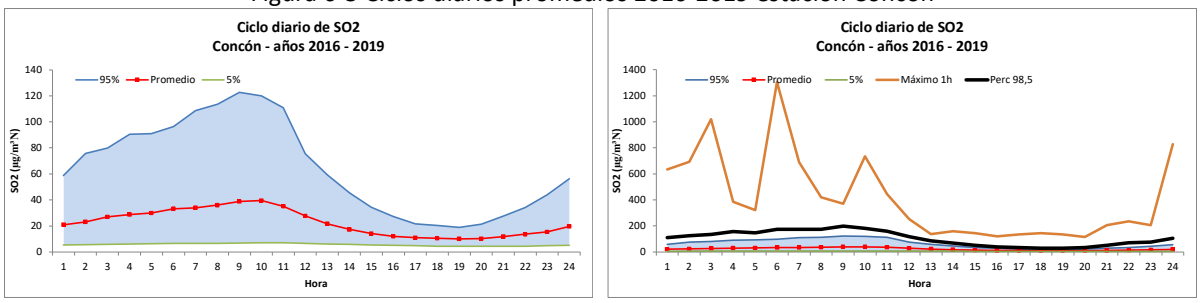
La Figura 6-3, la Figura 6-4 y la Figura 6-5 presentan los ciclos diarios para las estaciones Concón, Quintero y Los Maitenes respectivamente. El gráfico de la izquierda incluye la curva promedio como ciclo diario (en rojo), Percentil 95 (celeste) y Percentil 5 (verde). El gráfico de la derecha incluye las mismas variables de la izquierda, más valores máximos horarios de SO_2 (café), que permiten identificar el valor máximo horario del período y Percentil 98,5[71] (negro). El eje x desde 1 a 24 corresponde a las horas del día de la primera hora (00:00) hasta la 24 (23:00). El eje y a las concentraciones de SO_2 en µg/m³N.

De acuerdo con la Figura 6-3, en Concón las concentraciones de SO_2 para los ciclos diarios y máximos horarios aumentan en el período nocturno y mañanas alcanzando máximos entre las 07:00 y 10:00 luego hay descenso hasta valores más bajos entre las 16:00 y 19:00. Este comportamiento está relacionado con el ciclo de la dirección de viento que durante el período diurno aleja las emisiones de la principal fuente (Refinería) ubicada al Sureste de la estación, situación analizada posteriormente en las figuras con rosas de concentraciones de SO_2. Para el Percentil 95 se alcanza un máximo de aproximadamente 120 µg/m³N en Concón a las 08:00, es decir un 5% de las horas está sobre ese valor. Para el ciclo promedio el máximo valor es cercano a

[71]Se incluye sólo como referencia considerando el DS 104 (criterio norma actual SO_2)

40 µg/m³N a las 09:00. Para el Percentil 98,5 se alcanza un máximo de 197 µg/m³N a las 08:00. El valor máximo horario del período es 1305 µg/m³N ocurrido a las 05:00.

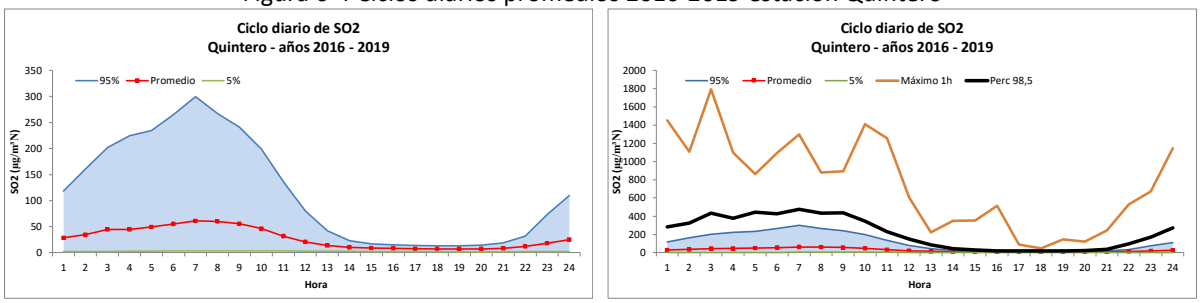
Figura 6-3 Ciclos diarios promedios 2016-2019 estación Concón



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA

De acuerdo con la Figura 6-4, las concentraciones de SO_2 en la estación Quintero para los ciclos diarios y máximos horarios tienen un comportamiento similar al registrado en Concón, es decir aumentan en el período nocturno y mañanas alcanzando máximos entre las 05:00 y 08:00 luego hay descenso hasta valores más bajos entre las 13:00 y 20:00. Este comportamiento también está relacionado con el ciclo de la dirección de viento que durante el período diurno aleja las emisiones de la principal fuente (Fundición) ubicada al Noreste de la estación, situación analizada posteriormente en las figuras con rosas de concentraciones de SO_2. Para el Percentil 95 se alcanza un máximo de aproximadamente 300 µg/m³N a las 06:00. Para el ciclo promedio el máximo valor es 61 µg/m³N y para el Percentil 98,5 se alcanza un máximo de 476 µg/m³N ambos a las 06:00. El valor máximo horario del período es 1794 µg/m³N ocurrido a las 02:00.

Figura 6-4 Ciclos diarios promedios 2016-2019 estación Quintero

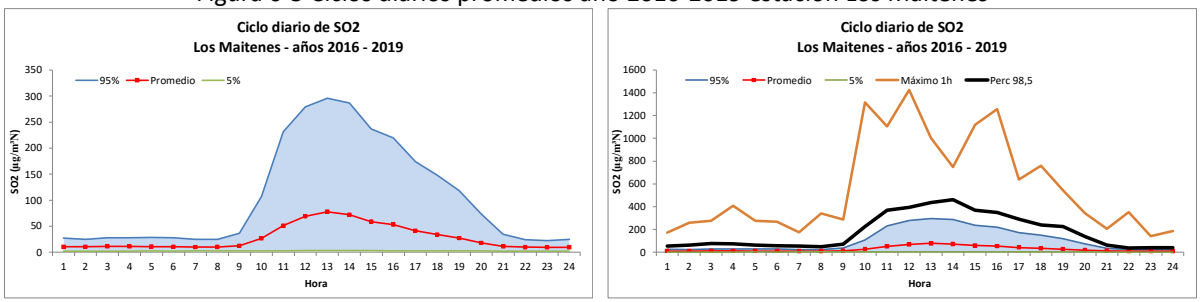


Fuente: Elaboración propia con datos de MMA

De acuerdo con la Figura 6-5, las concentraciones de SO_2 en la estación Los Maitenes para los ciclos diarios y máximos horarios tienen un comportamiento opuesto al registrado en Concón y Quintero, es decir concentraciones bajas en el período nocturno y mañanas (desde 21:00 a 09.00) y aumento durante las tardes alcanzando máximos entre las 11:00 y 16:00. Este comportamiento también está relacionado con el ciclo de la dirección de viento que durante el período diurno acerca las emisiones de la principal fuente (Fundición) ubicada al Noroeste de la estación, situación analizada posteriormente en las figuras con rosas de concentraciones de SO_2. Para el Percentil 95 se alcanza un máximo de 296 µg/m³N a las 12:00. Para el ciclo promedio el máximo

valor es 78 µg/m³N a las 12:00 y para el Percentil 98,5 se alcanza un máximo de 461 µg/m³N a las 13:00. El valor máximo horario del período es 1425 µg/m³N ocurrido a las 11:00.

Figura 6-5 Ciclos diarios promedios año 2016-2019 estación Los Maitenes



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA

6.2.3 Ciclo diario y estacional de concentraciones horarias de SO_2 v/s la diferencia de temperatura entre 40 y 10m

Para estudiar el comportamiento de las concentraciones de SO_2 v/s la diferencia de temperatura entre los niveles ubicados a 40m y 10m (T40m-T10m) en las estaciones de Concón, Quintero y Los Maitenes se han elaborado para cada una de ellas 2 gráficos para el período 2016 a 2019. El primero corresponde al ciclo diario y el segundo al ciclo estacional.

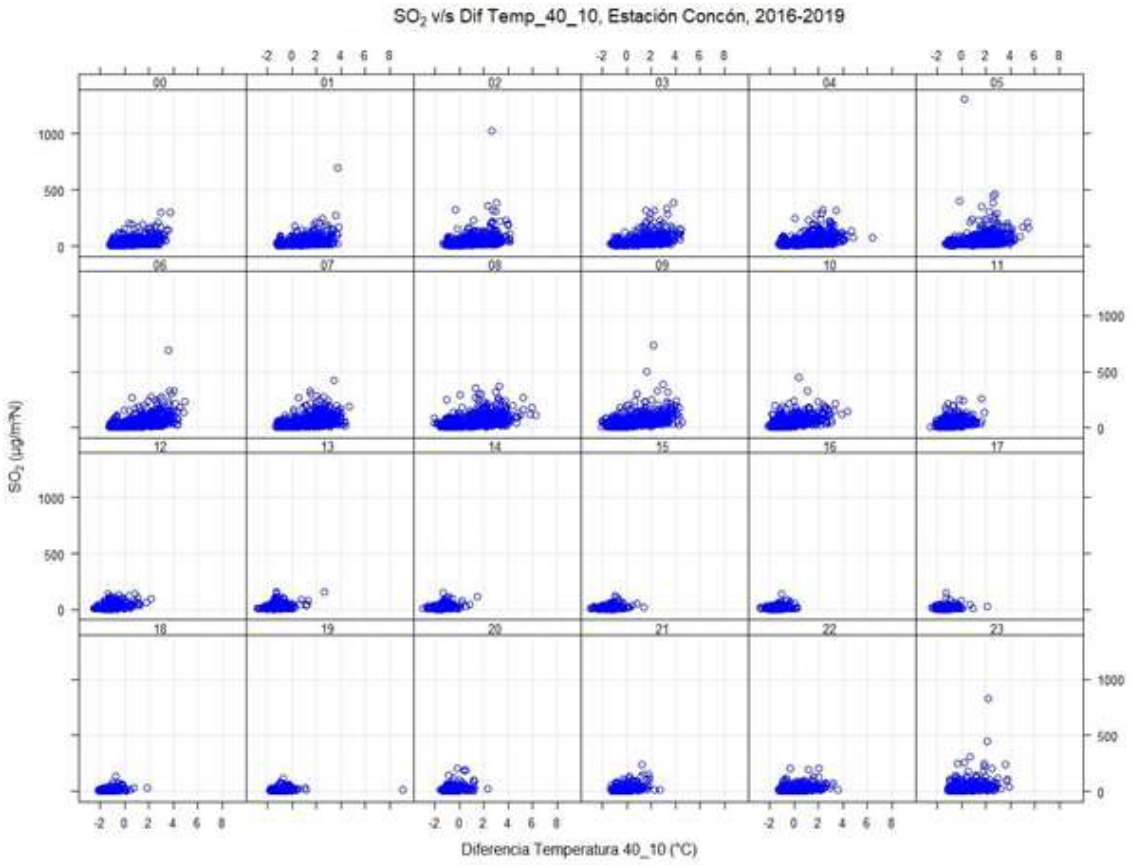
La Figura 6-6, la Figura 6-8 y la Figura 6-10 corresponden al ciclo diario. Cada figura incluye un despliegue matricial en el cual se presentan 24 gráficos de dispersión, uno para cada hora desde la hora 00:00 (identificado como 00) hasta la hora 23:00 (23). Cada gráfico de dispersión tiene la misma escala, ubicando en el eje Y las concentraciones de SO_2 (desde 0 a 1500 µg/m³N) y en el eje X la diferencia de temperatura (desde -4°C a 10°C, con intervalos cada 2 °C).

La Figura 6-7, la Figura 6-9 y la Figura 6-11 corresponden al ciclo estacional. En cada figura se presentan 4 gráficos ordenados, 2 arriba como Primavera (Spring) que considera los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre, luego Verano (Summer) para Diciembre, Enero y Marzo, abajo continúa con Otoño (Autumn) para Marzo, Abril y Mayo y termina con Invierno (Winter) para Junio, Julio y Agosto.) Cada gráfico de dispersión tiene la misma escala, ubicando en el eje Y las concentraciones de SO_2 (desde 0 a 1500 µg/m³N) para Concón y Los Maitenes y de 0 a 2000 µg/m³N para Quintero) y en el eje X la diferencia de temperatura (desde -4°C a 10°C, con intervalos cada 2 °C).

La Figura 6-6 muestra que en la estación Concón las mayores concentraciones de SO_2 se alcanzan a partir de la medianoche (entre las 23:00 y las 00:00 hrs.) hasta las 10 de la mañana aproximadamente, con valores positivos de diferencia de temperatura (dT>2°C para valores de SO_2>500µg/m^3).

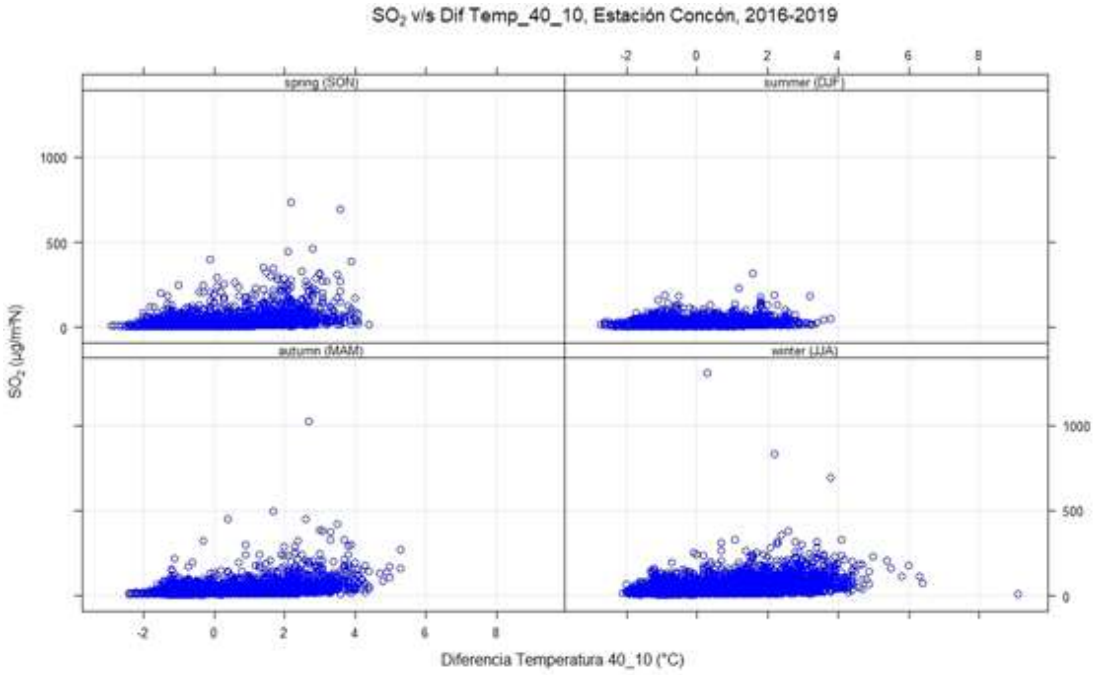
De acuerdo con la Figura 6-7 en Concón, durante el invierno se da la mayor frecuencia de ocurrencia de casos de altas concentraciones de SO_2, seguido por la primavera y el otoño.

Figura 6-6 Comportamiento SO_2 (µg/m^3) v/s diferencia de temperatura 40-10m (°C), ciclo diario Concón 2016-2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

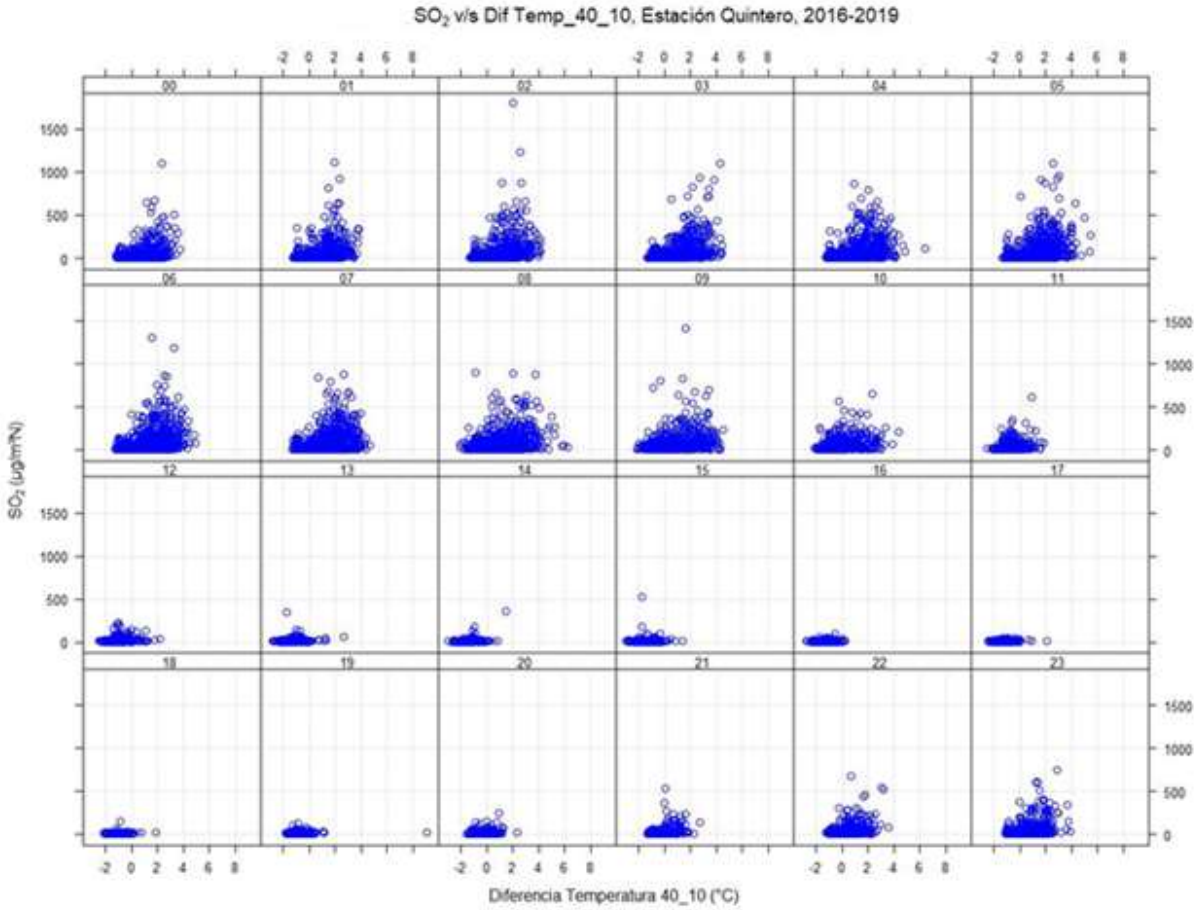
Figura 6-7 Comportamiento SO_2 v/s diferencia de temperatura 40-10m, ciclo estacional Concón 2016-2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

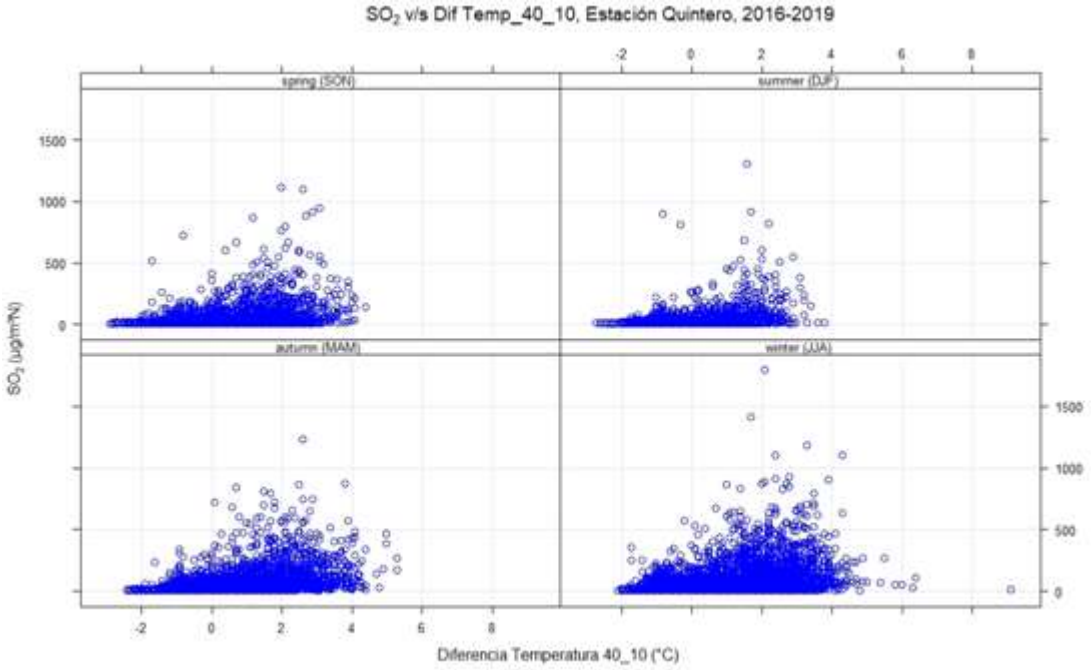
La Figura 6-8 y la Figura 6-9 muestran que en la estación Quintero, al igual que en la estación Concón, las mayores concentraciones de SO_2 se alcanzan desde la medianoche (entre las 23:00 y las 00:00 hrs) hasta aproximadamente las 10 de la mañana, con valores positivos de diferencia de temperatura (dT>0°C para valores SO_2>500µg/m^3), existiendo en algunos casos valores altos de SO_2 con valores negativos de dT. Durante los meses de invierno hay mayor frecuencia de ocurrencia de casos de altas concentraciones de SO_2, seguido del otoño y la primavera. Sin embargo, en verano también se pueden observar varios valores mayores a 500 µg/m^3.

Figura 6-8 Comportamiento SO_2 v/s diferencia de temperatura 40-10m, ciclo diario Quintero 2016-2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

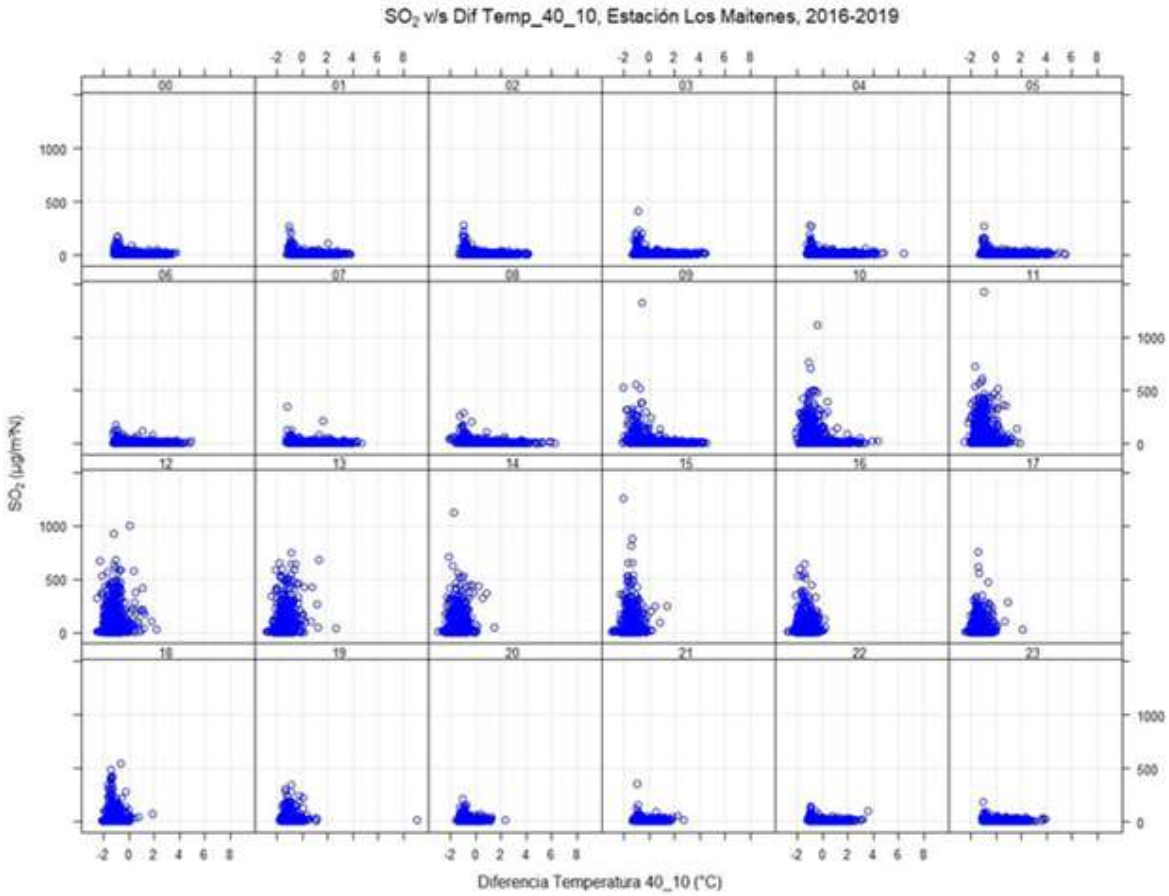
Figura 6-9 Comportamiento SO_2 v/s diferencia de temperatura 40-10m, ciclo estacional Quintero 2016-2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

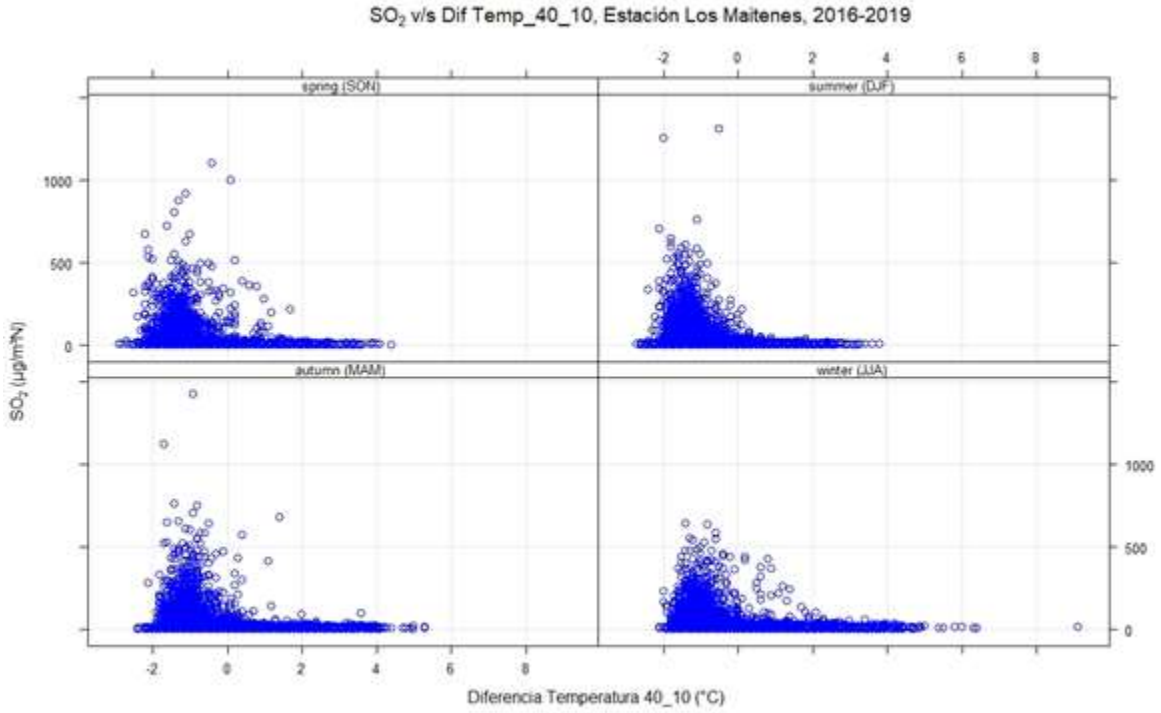
La Figura 6-10 y la Figura 6-11, muestran que en Los Maitenes, a diferencia de Concón y Quintero, las mayores concentraciones de SO_2 se alcanzan desde las 09 de la mañana hasta las 5 de la tarde, con valores positivos y negativos del dT. Pueden ocurrir casos de altas concentraciones durante todo el año, con mayor dispersión en primavera.

Figura 6-10 Comportamiento SO_2 v/s diferencia de temperatura 40-10m, ciclo diario Los Maitenes 2016-2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

Figura 6-11 Correlación SO_2 v/s diferencia de temperatura 40-10m, ciclo estacional Los Maitenes 2016-2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

Conclusión: Analizando la diferencia de temperatura en la Torre entre 40 y 10 m, se observa que respecto al ciclo diario, Quintero y Concón presentan características similares en cuanto a que las mayores concentraciones de SO_2 se registran típicamente con un dTt>0 durante el periodo nocturno o primeras horas de la mañana. En Los Maitenes en tanto, las mayores concentraciones se registran en el transcurso del día cuando en la Torre el dT es mayoritariamente <0.

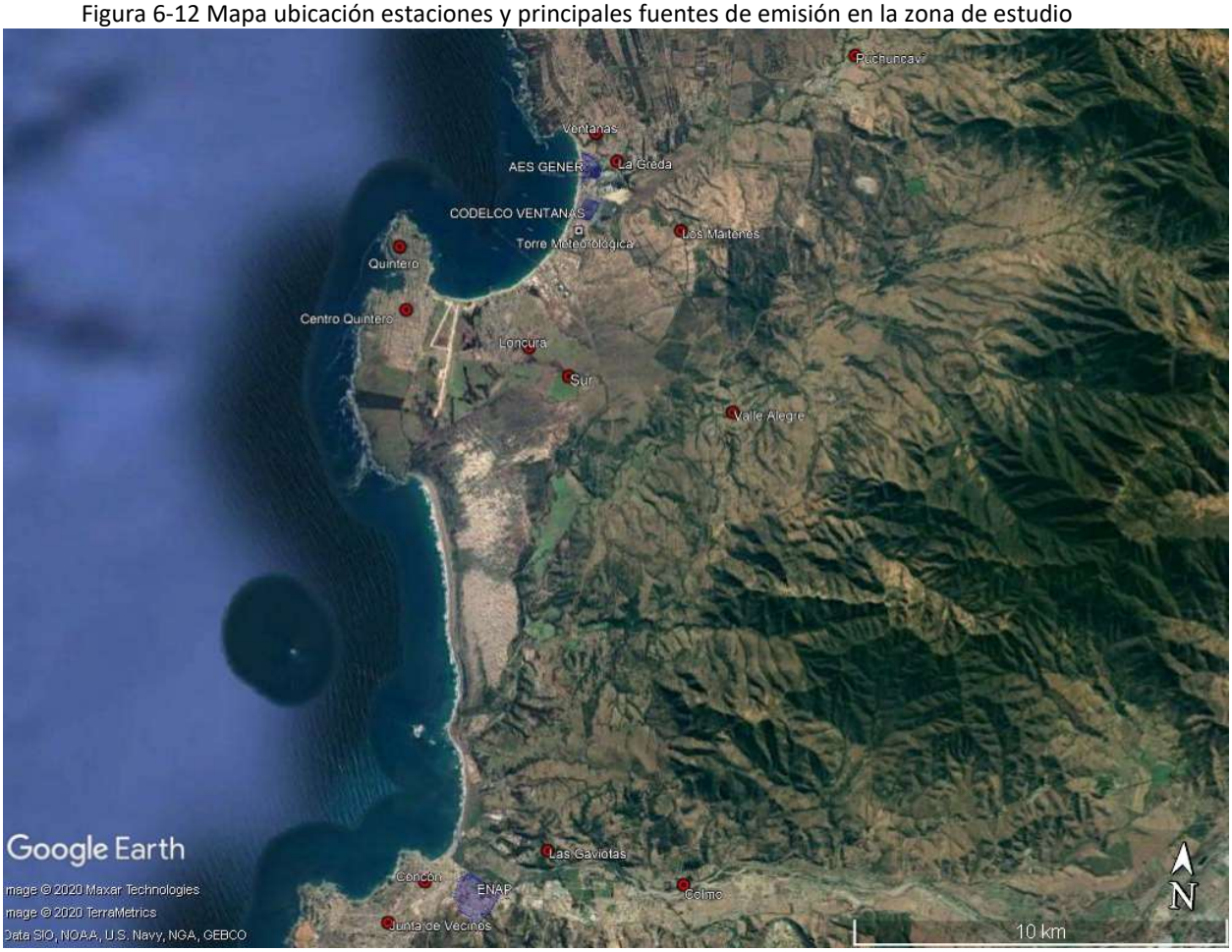
En relación con el ciclo estacional en Quintero y Concón, las mayores concentraciones de SO_2 se concentran principalmente en el periodo frío, en tanto en Los Maitenes, se presentan altos valores de SO_2 durante todo el año, con una mayor dispersión en primavera.

6.2.4 Mapa ubicación estaciones y fuentes principales de emisión

De modo de relacionar con más facilidad los efectos en la distribución de las concentraciones asociadas a la dirección y magnitud del viento, se muestra un mapa con la ubicación de las estaciones de monitoreo, y las principales fuentes emisoras.

El mapa señala con puntos rojos la ubicación de las estaciones de monitoreo de la zona de estudio, y con manchas moradas las principales fuentes de emisión.

Figura 6-12 Mapa ubicación estaciones y principales fuentes de emisión en la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia con datos de Inventarios de Emisión proporcionados por la contraparte técnica

Se identifican 3 principales fuentes de emisión, al norte de la zona de estudio AES Gener y Codelco Ventanas, y al Sur ENAP en Concón (círculos morados).

La estación de Los Maitenes se ubica al Sureste de los complejos industriales de AES Gener y CODELCO Ventanas, hacia el interior, mientras que Quintero se ubica al Suroeste de las mismas fuentes. Concón en tanto se ubica inmediatamente al Oeste-noroeste de ENAP.

Considerando las brisas térmicas, que van de mar a tierra durante el día, y tierra mar durante la noche, y la ubicación de las fuentes de emisión respecto a las estaciones de monitoreo, se puede inferir lo siguiente:

- Tanto para Concón como Quintero, las mayores concentraciones se darían durante el periodo nocturno (brisa tierra-mar) que se extiende hasta las primeras horas de la mañana) con vientos de componente Este (SE en Concón y NE en Quintero)
- En cambio, en Los Maitenes, se esperarían concentraciones más altas durante el día (brisa mar-tierra) con vientos de componente Oeste (NW).

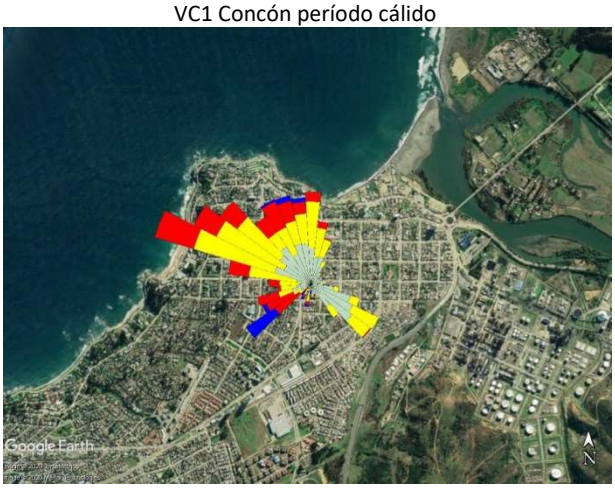
6.2.5 Rosas de viento según las configuraciones meteorológicas

Previo al análisis de rosas de concentración, se incluye análisis de rosas de viento asociadas a las diferentes configuraciones meteorológicas.

En la Figura 6-13 se muestran mapas con rosas de viento para las estaciones de Concón, Quintero y Puchuncaví, durante el período frío (abril-septiembre) y cálido (octubre-marzo) año 2018, para la configuración meteorológica más relevante, la formación de vaguada costera (VC1). Los mapas que consideran las 9 configuraciones restantes para las 3 estaciones analizadas, fueron enviados en Anexo digital junto al Informe de Avance 2 (corresponden a archivos kml para visualizar con Google Earth).

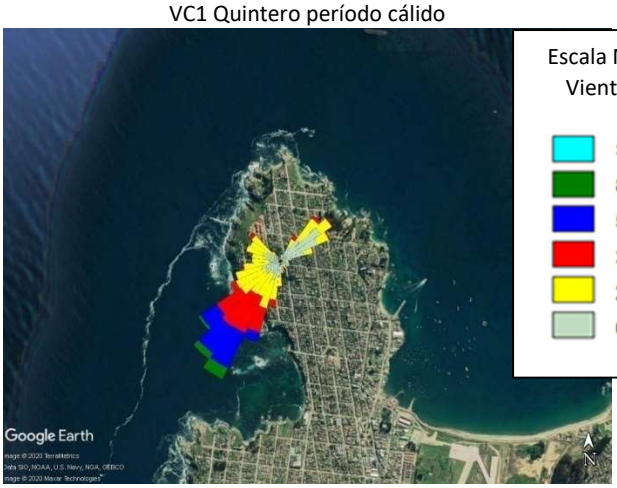
Figura 6-13 Mapas con rosas de viento para las estaciones de Concón, Quintero y Los Maitenes en presencia de Vaguadas Costeras, durante periodo frío y cálido del año 2018

VC1 Concón período cálido



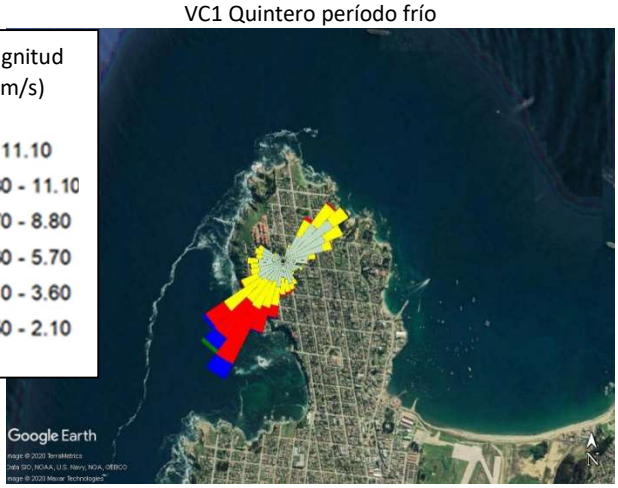
VC1 Concón período frío

VC1 Quintero período cálido



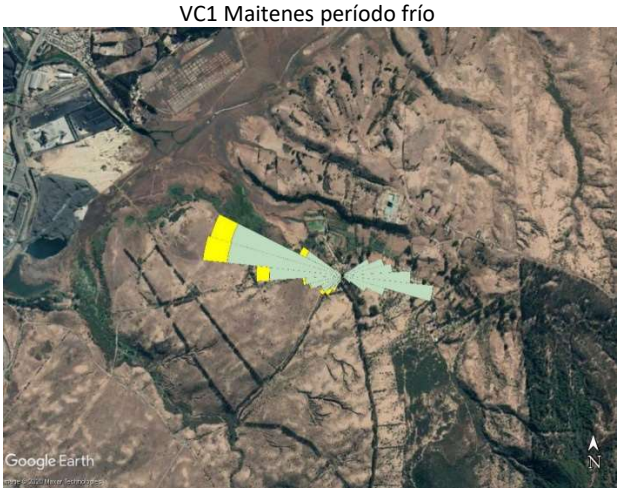
Escala Magnitud Viento (m/s)

VC1 Quintero período frío



VC1 Maitenes período cálido

VC1 Maitenes período frío



Fuente: Elaboración propia con datos de estaciones de monitoreo y configuraciones meteorológicas

Considerando el análisis según ubicación y brisas térmicas, y estos resultados para la fase VC1, se puede inferir que:

- Las mayores concentraciones en Concón se asociarían a vientos de componente SE, más frecuentes en el periodo frío, fortalecidos además por la VC1 que asocia vientos de componente Este.
- Las mayores concentraciones en Quintero se asociarían a vientos de componente NE, que se refuerzan más en el periodo frío y en presencia de VC1.
- Las mayores concentraciones en Los Maitenes se asociarían a vientos diurnos de componente NW, que se refuerzan ligeramente en el periodo frío.

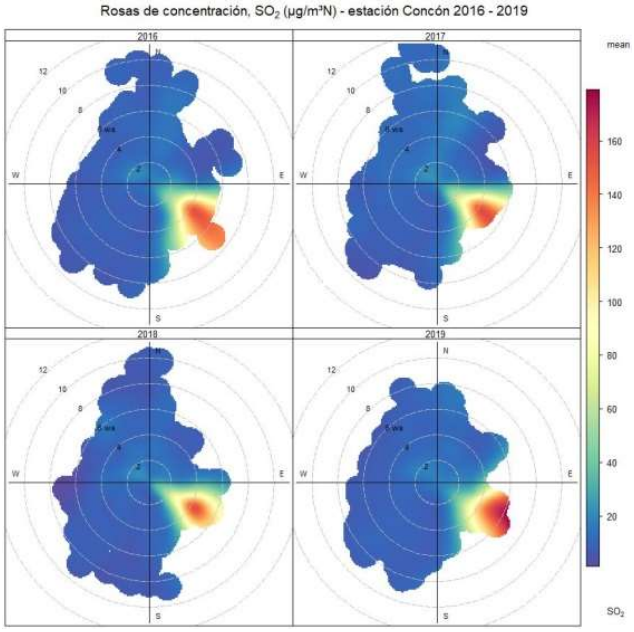
6.2.6 Ciclo interanual, anual y diario promedio mediante Rosas de concentración de SO_2

6.2.6.1 Ciclo interanual

Las Figuras siguientes muestran rosas de concentraciones promedios de SO_2 para las estaciones de Concón, Quintero y Los Maitenes para el periodo 2016-2019. Cada rosa de concentración presenta la concentración de SO_2 en escala de colores, la dirección desde donde viene el viento y su magnitud (ws en m/s) en forma de distancia radial. Las rosas fueron generadas con la aplicación OpenAir, cada punto en el gráfico corresponde a un valor promedio de las concentraciones SO_2 en cada uno de los años desde 2016 a 2019 para la dirección y velocidad respectiva.

Considerando los años 2016 a 2019 para la estación de Concón, las rosas de concentración de SO_2 anuales muestran un patrón claro respecto a los valores máximos anuales en función del viento, asociando vientos provenientes del sureste de 3 a 7 m/s.

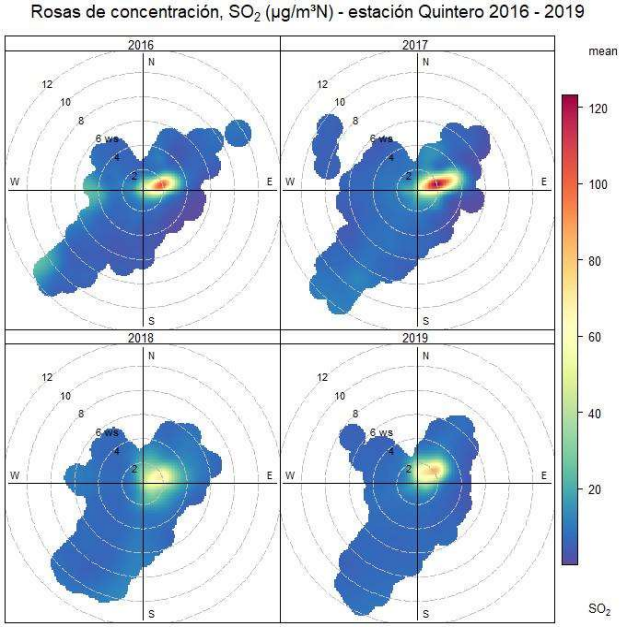
Figura 6-14 Rosa anual de concentración de SO_2, estación Concón 2016 a 2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

Para la estación de Quintero, las rosas de concentración de SO_2 anuales muestran un patrón claro respecto a los valores máximos anuales en función del viento, asociando vientos provenientes del este-noreste de 2 a 4 m/s. Los valores más altos se dieron en el año 2017.

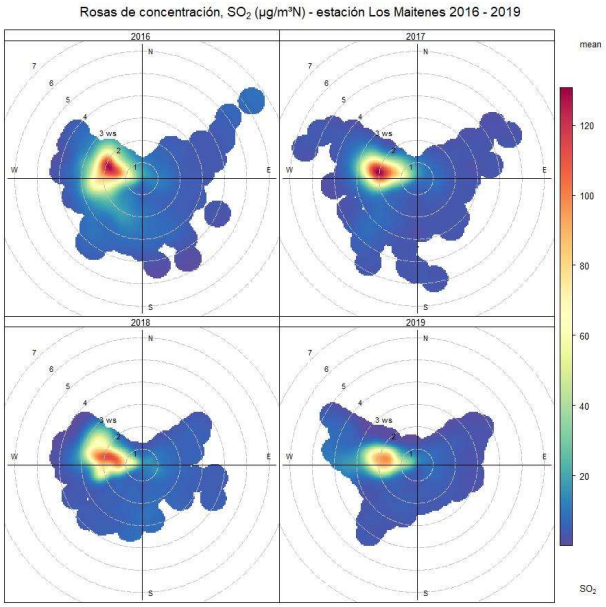
Figura 6-15 Rosa anual de concentración de SO_2, estación Quintero 2016 a 2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

Para la estación de Los Maitenes, las rosas de concentración de SO_2 anuales muestran un patrón claro respecto a los valores máximos en función del viento, asociando vientos provenientes del oeste-noroeste de 2 a 3 m/s. Los promedios más altos se dieron en los años 2016 y 2017.

Figura 6-16 Rosa anual de concentración de SO_2, estación Los Maitenes 2016 a 2019



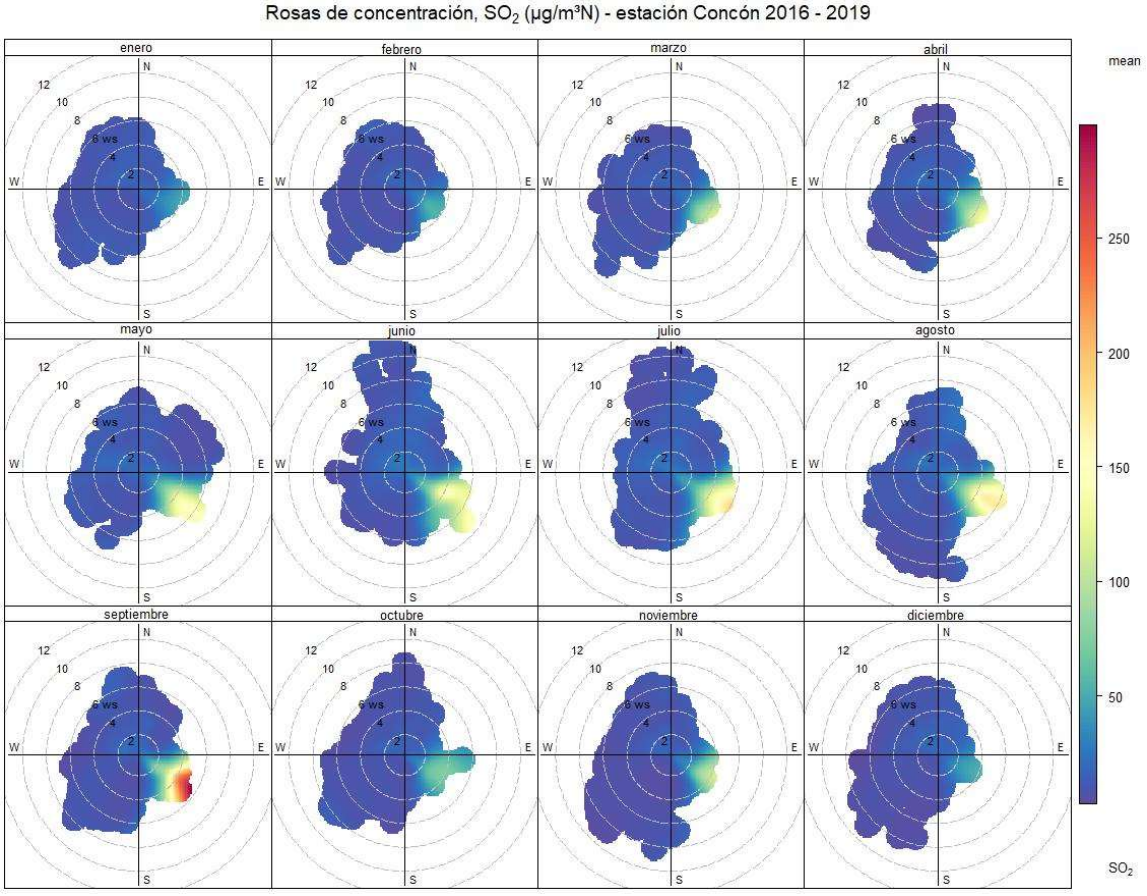
Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

6.2.6.2 Ciclo anual promedio

Las figuras siguientes corresponden a un arreglo matricial de rosas mensuales para construir un año promedio, donde cada mes corresponde al promedio del mes entre 2016 y 2019. Al igual que las rosas anuales, las rosas mensuales fueron generadas con la aplicación OpenAir. Cada rosa de concentración presenta la concentración de SO_2 en escala de colores, la dirección desde donde viene el viento y su magnitud (ws en m/s) en forma de distancia radial.

De acuerdo con la Figura 6-17 para Concón, las mayores concentraciones de SO_2 del orden de 250 µg/m³N en promedio mensual (significativamente más altas que en las estaciones de Quintero y Los Maitenes), se registran en el mes de septiembre, con vientos provenientes del sureste, con una intensidad de 5 m/s. En otoño e invierno las concentraciones mensuales están en torno a 150 µg/m³N, con el mismo patrón de viento sureste (brisa tierra-mar). Es importante mencionar que las altas concentraciones en el mes de septiembre de 2016 corresponden a una situación puntual sin reiterarse en años posteriores en la cual 2 días presentaron altas concentraciones de SO_2.

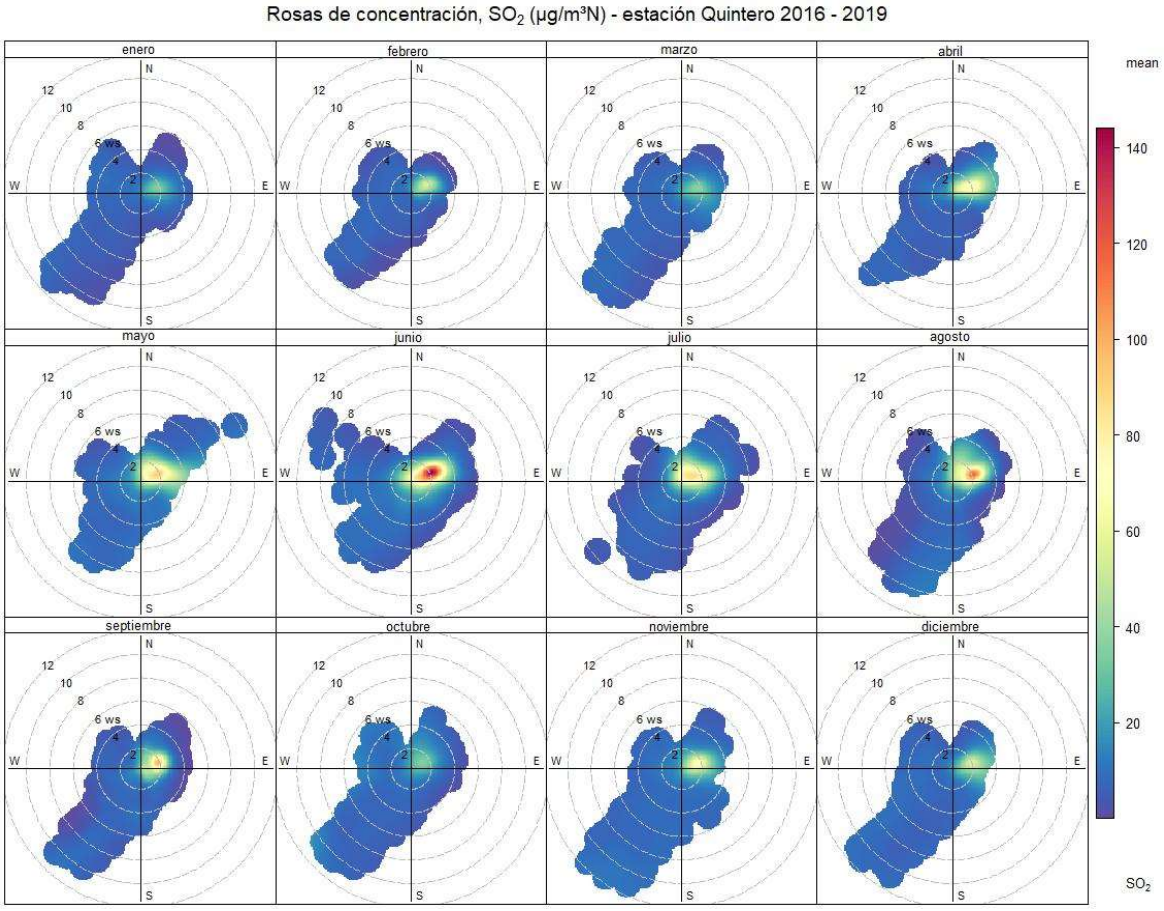
Figura 6-17 Rosas de concentración de SO_2 ciclo anual para estación Concón 2016-2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

De acuerdo con la Figura 6-18 para Quintero, las mayores concentraciones de SO_2 se observan desde los meses de abril a septiembre, con un máximo del orden de 140 µg/m³N en promedio en el mes de junio, con vientos provenientes desde el este-noreste, con una intensidad de 3 m/s. Es destacable observar la ausencia de vientos de componente Norte en invierno asociados a frentes, se sugiere revisar la exposición de la estación respecto a esa dirección.

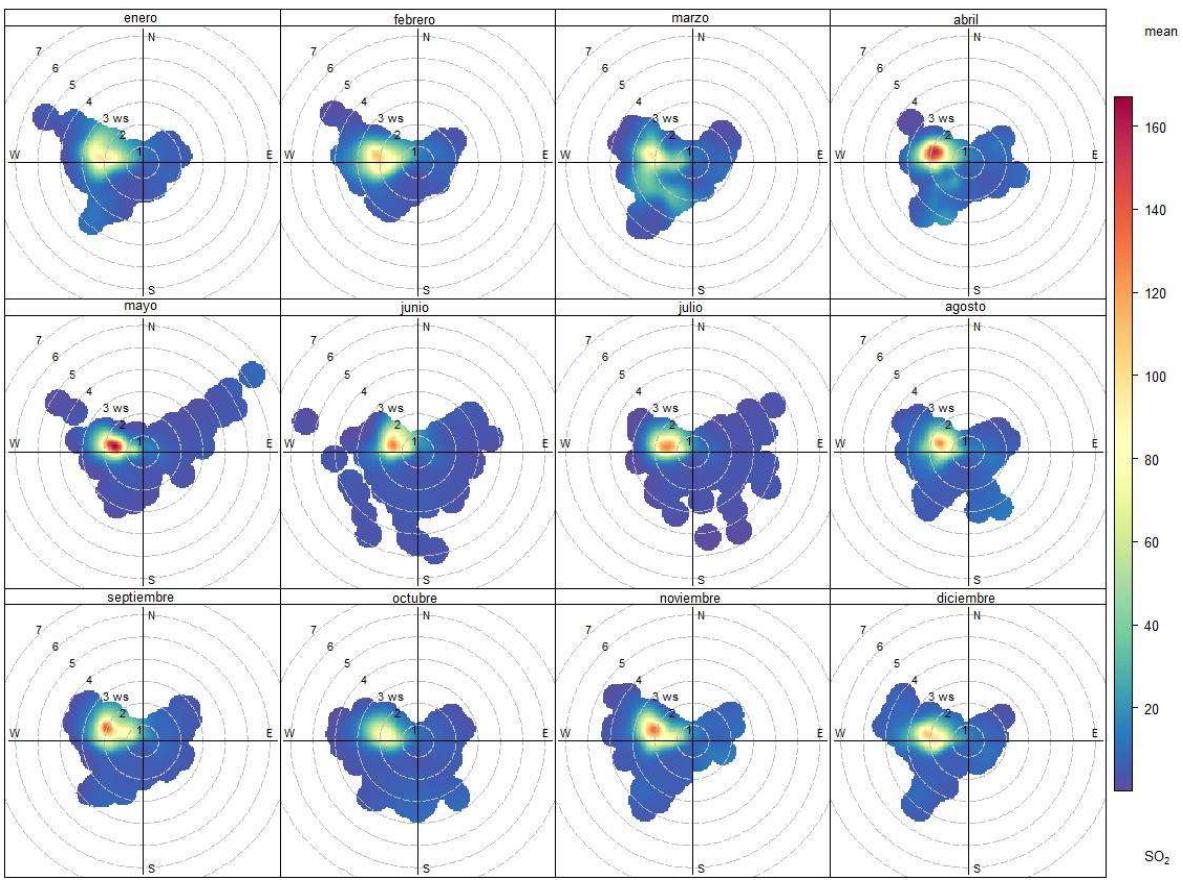
Figura 6-18 Rosas de concentración de SO_2 ciclo anual para estación Quintero 2016-2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

De acuerdo con la Figura 6-19 para Los Maitenes, las mayores concentraciones de SO_2 se pueden observar a lo largo de todo el año, con máximos del orden de 160 µg/m³N en promedio en los meses de abril y mayo, con vientos provenientes desde el oeste-noroeste, con una intensidad de 2 a 3 m/s.

Figura 6-19 Rosas de concentración de SO_2 ciclo anual para estación Los Maitenes 2016-2019



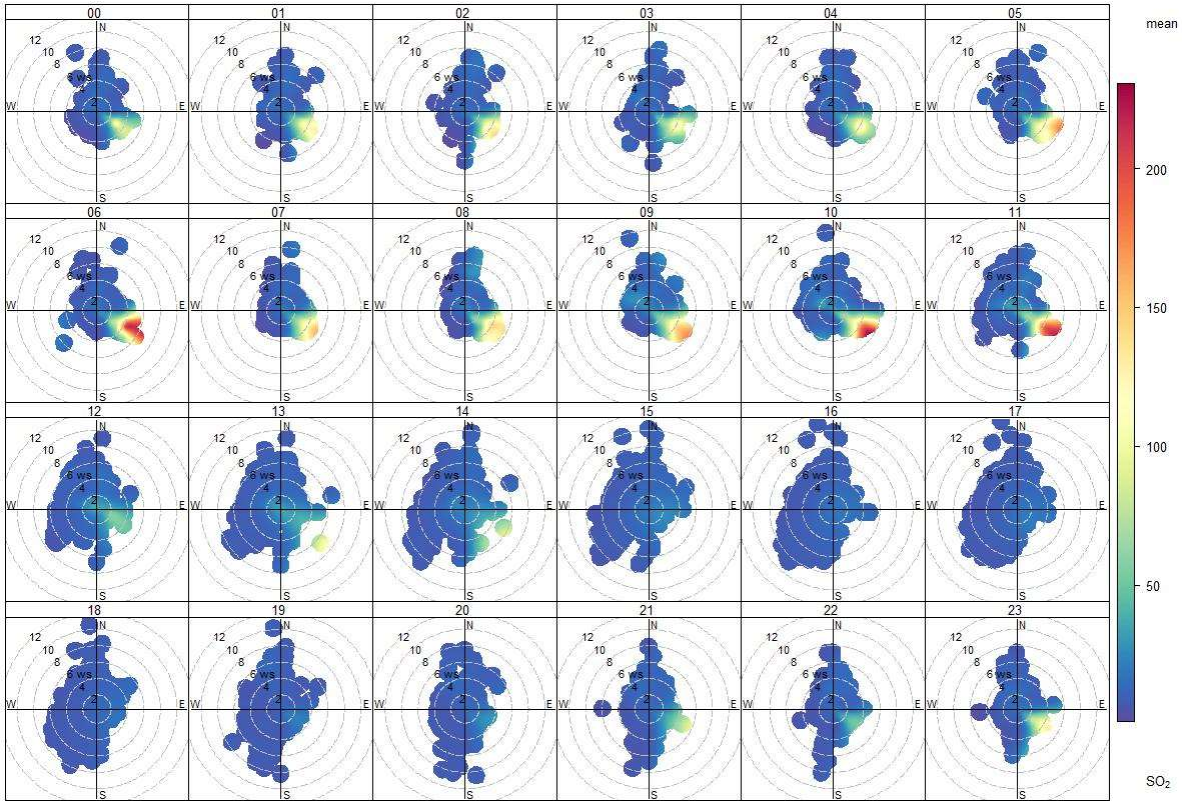
Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

6.2.6.3 Ciclo diario promedio

Las figuras siguientes corresponden a un arreglo matricial de rosas horarias para construir un día promedio, donde cada hora corresponde al promedio de la hora entre 2016 y 2019. Al igual que las rosas anuales y mensuales, las rosas horarias fueron generadas con la aplicación OpenAir. Cada rosa de concentración presenta la concentración de SO_2 en escala de colores, la dirección desde donde viene el viento y su magnitud (ws en m/s) en forma de distancia radial.

La Figura 6-20 muestra que las mayores concentraciones medias horarias de SO_2 (mayor a 200 µg/m^{3}N) están asociadas a un patrón común de vientos de componente Sureste, desde las 11 de la noche hasta alrededor del mediodía (11 de la mañana), con magnitudes variables, que van desde los 2 a los 6 m/s.

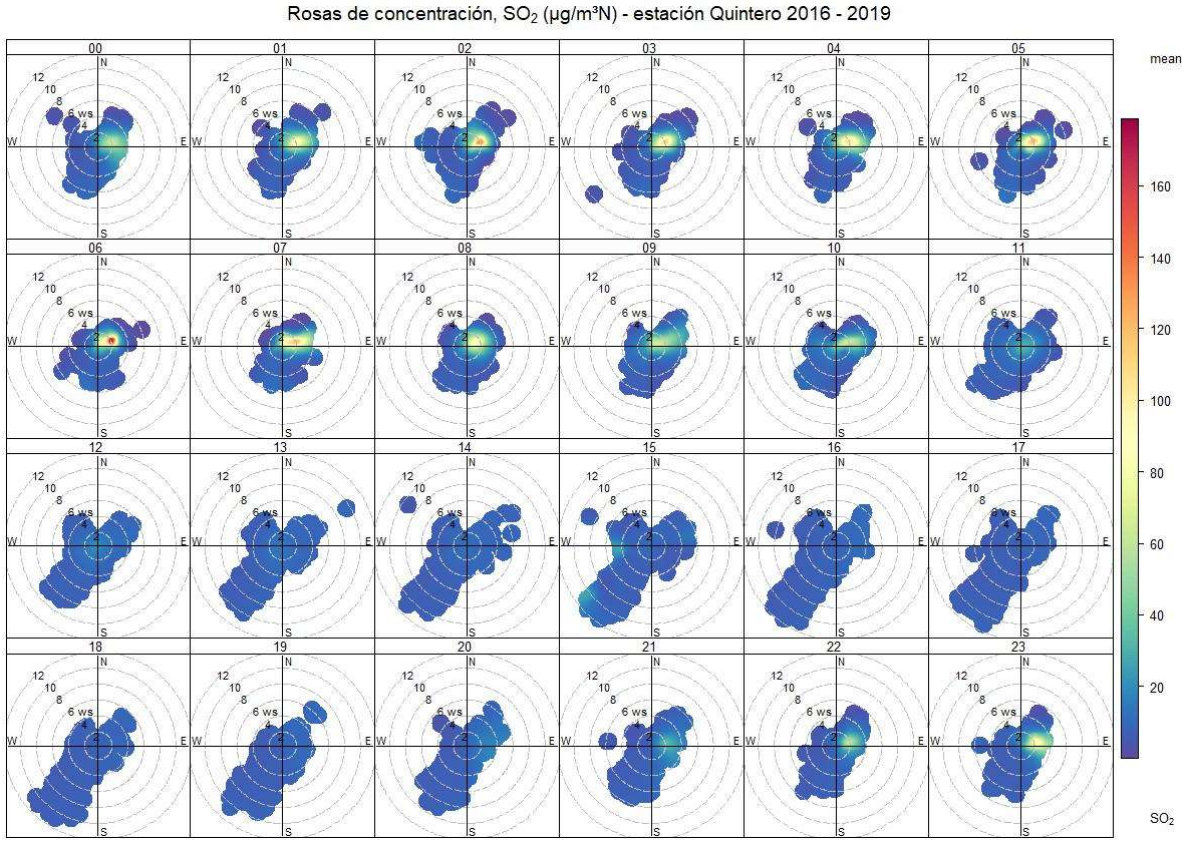
Figura 6-20 Rosas de concentración de SO_2 ciclo diario para estación Concón 2016-2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

La Figura 6-21 muestra rosas de concentraciones de SO_2 horarias diarias para la estación de Quintero. Las mayores concentraciones medias de SO_2 están asociadas a un patrón común de vientos de componente este-noreste desde las 11 de la noche hasta la 10 de la mañana, con magnitudes débiles del orden de 2 m/s para el periodo 2016-2019.

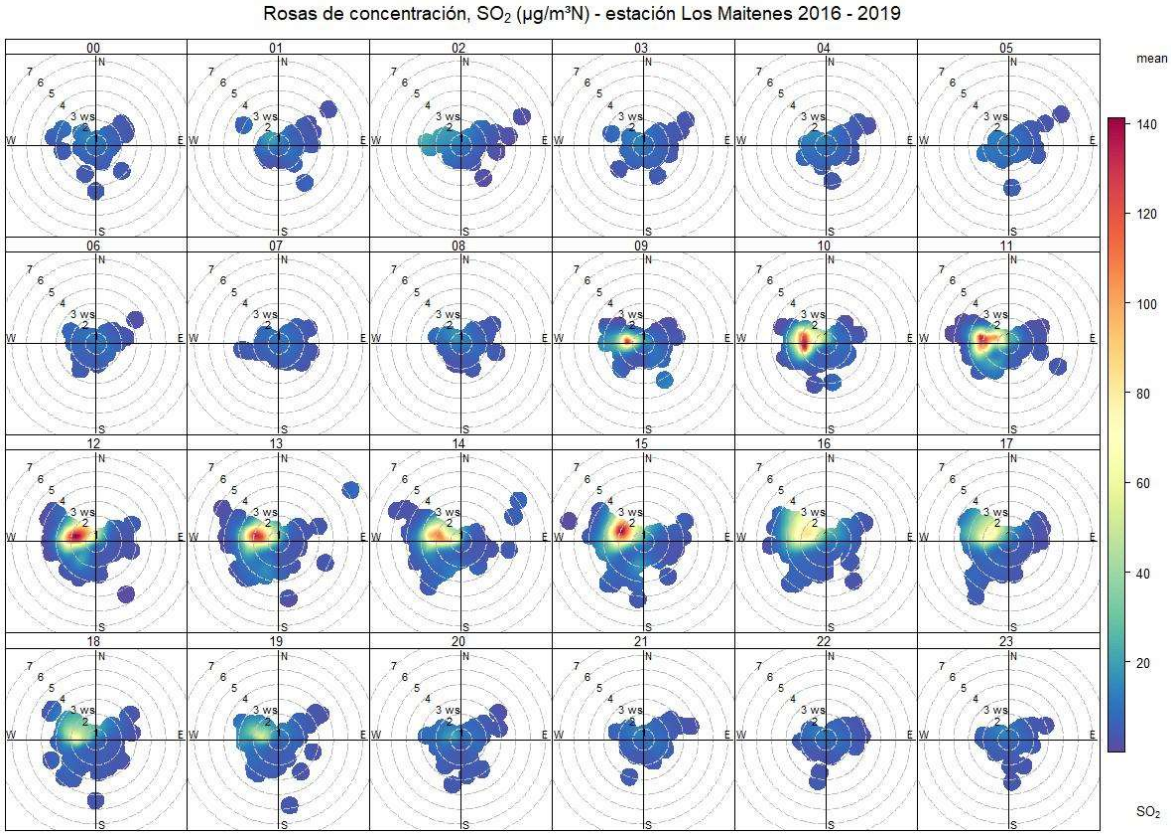
Figura 6-21 Rosas de concentración de SO_2 ciclo diario para estación Quintero 2016-2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

La Figura 6-22 muestra rosas de concentraciones de SO_2 horarias diarias para la estación de Los Maitenes. A diferencia de las estaciones ubicadas cerca del borde costero, las mayores concentraciones medias de SO_2 están asociadas a un patrón de vientos de componente Oeste-Noroeste en horas de calentamiento y brisa diurna (09 a 17 horas), con magnitudes del orden de 1 a 3 m/s para el periodo 2016-2019.

Figura 6-22 Rosas de concentración de SO_2 ciclo diario para estación Los Maitenes 2016-2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

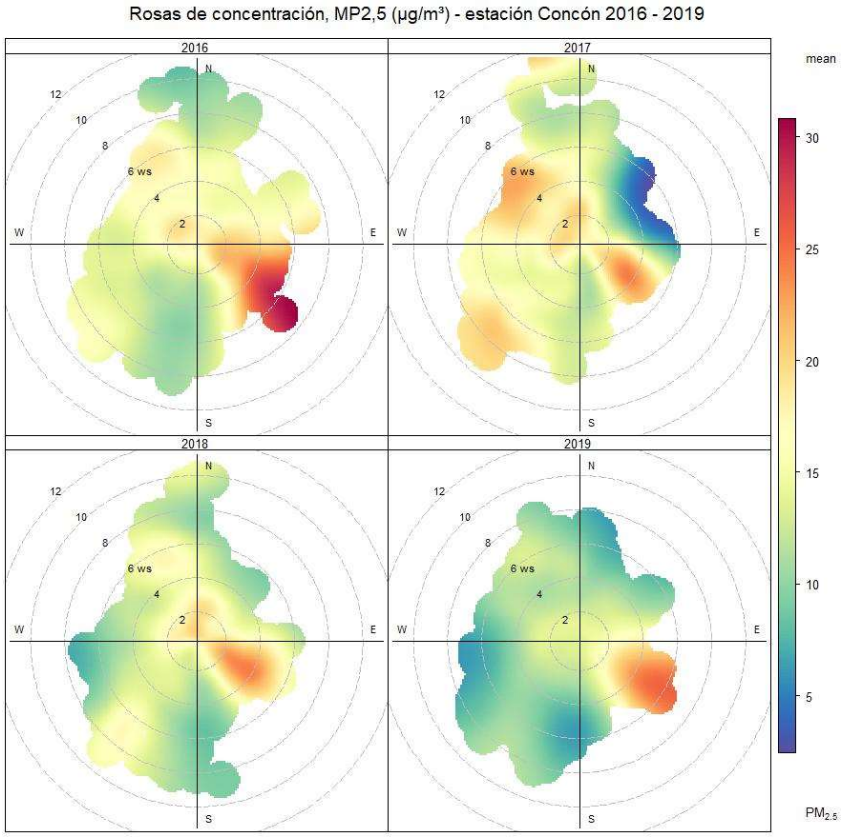
6.2.7 Ciclo interanual, anual y diario de concentración de MP2,5

6.2.7.1 Ciclo interanual

Las Figuras siguientes muestran rosas de concentraciones promedios de MP2,5 para las estaciones de Concón, Quintero y Los Maitenes para el periodo 2016-2019. Cada rosa de concentración presenta la concentración de MP2,5 en escala de colores, la dirección desde donde viene el viento y su magnitud (ws en m/s) en forma de distancia radial. Las rosas fueron generadas con la aplicación OpenAir, cada punto en el gráfico corresponde a un valor promedio de las concentraciones MP2,5 en cada uno de los años desde 2016 a 2019 para la dirección y magnitud respectiva.

Respecto a la variabilidad anual en Concón, el año 2016 presenta los valores promedios más altos de MP2,5 del periodo, con vientos provenientes del Sureste de 6 a 8 m/s.

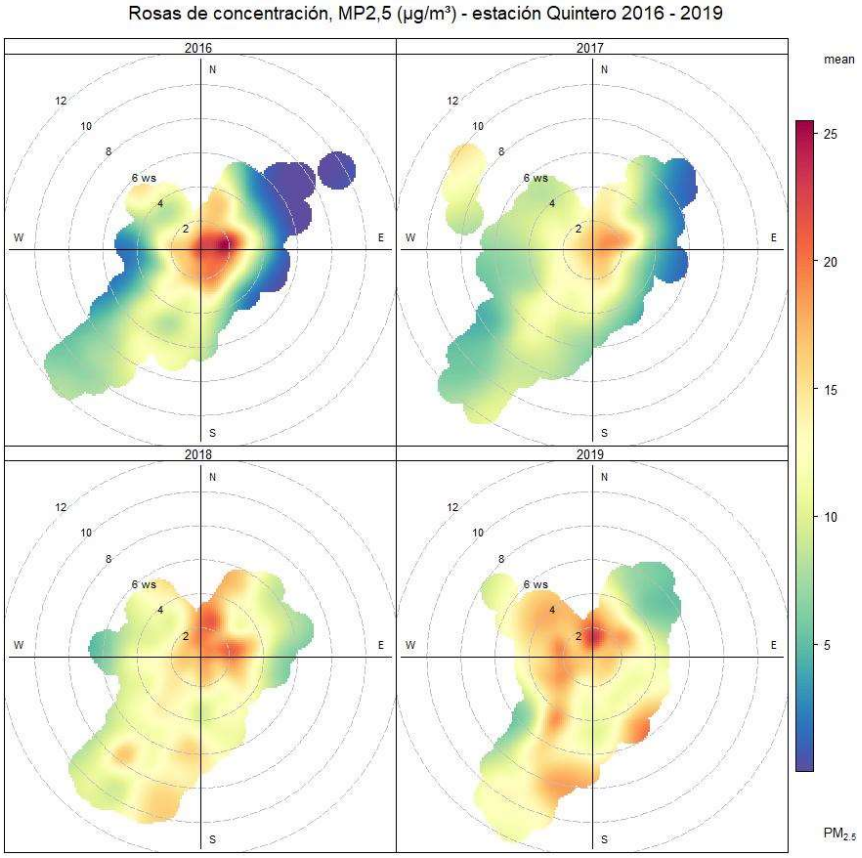
Figura 6-23 Rosas anuales de concentración de MP2,5, estación Concón 2016 a 2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

Respecto a la variabilidad anual en Quintero, el año 2016 presenta los valores promedios más altos de MP2,5 del periodo, con vientos débiles, cercanos a la calma.

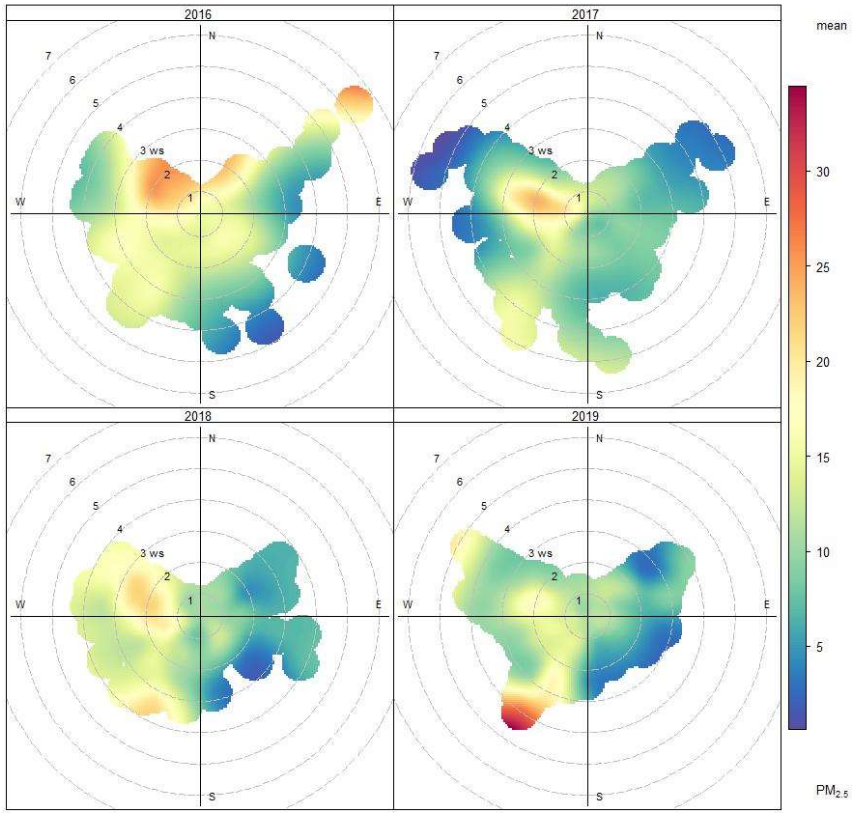
Figura 6-24 Rosas de concentración de MP2,5, Ciclo anual promedio, estación Quintero 2016 a 2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

Respecto a la variabilidad anual en Los Maitenes, el año 2019 presenta los valores promedios más altos de MP2,5 del periodo, asociando vientos del suroeste de 4 m/s.

Figura 6-25 Rosas de concentración de MP2,5, Ciclo anual promedio, estación Los Maitenes 2016 a 2019



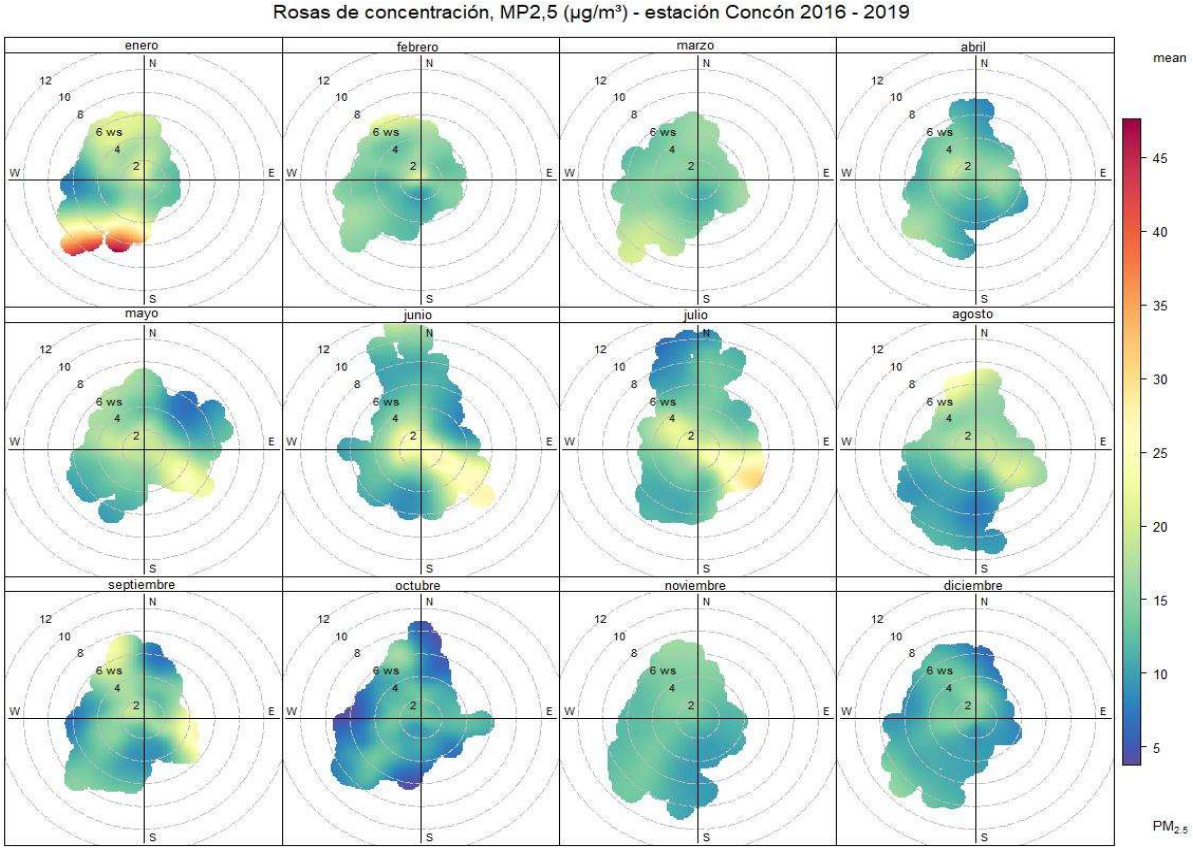
Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

6.2.7.2 Ciclo anual promedio

Las figuras siguientes corresponden a un arreglo matricial de rosas mensuales para construir un año promedio, donde cada mes corresponde al promedio del mes entre 2016 y 2019. Al igual que las rosas anuales, las rosas mensuales fueron generadas con la aplicación OpenAir. Cada rosa de concentración presenta la concentración de MP2,5 en escala de colores, la dirección desde donde viene el viento y su magnitud (ws en m/s) en forma de distancia radial.

Para Concón, Enero aparece con los valores promedios más altos de MP2,5 (45 µg/m^3 aproximadamente), asociando vientos provenientes del Suroeste de 4 a 8 m/s. Tal condición es excepcional, pues la dirección no guarda relación con los ciclos anuales y diarios, en que los máximos se relacionan con vientos del SE. Esto podría explicarse al considerar que esta estación presentó un aumento importante de SO_2 en Enero y Febrero del 2018, que se reflejó en los promedios y máximos mensuales.

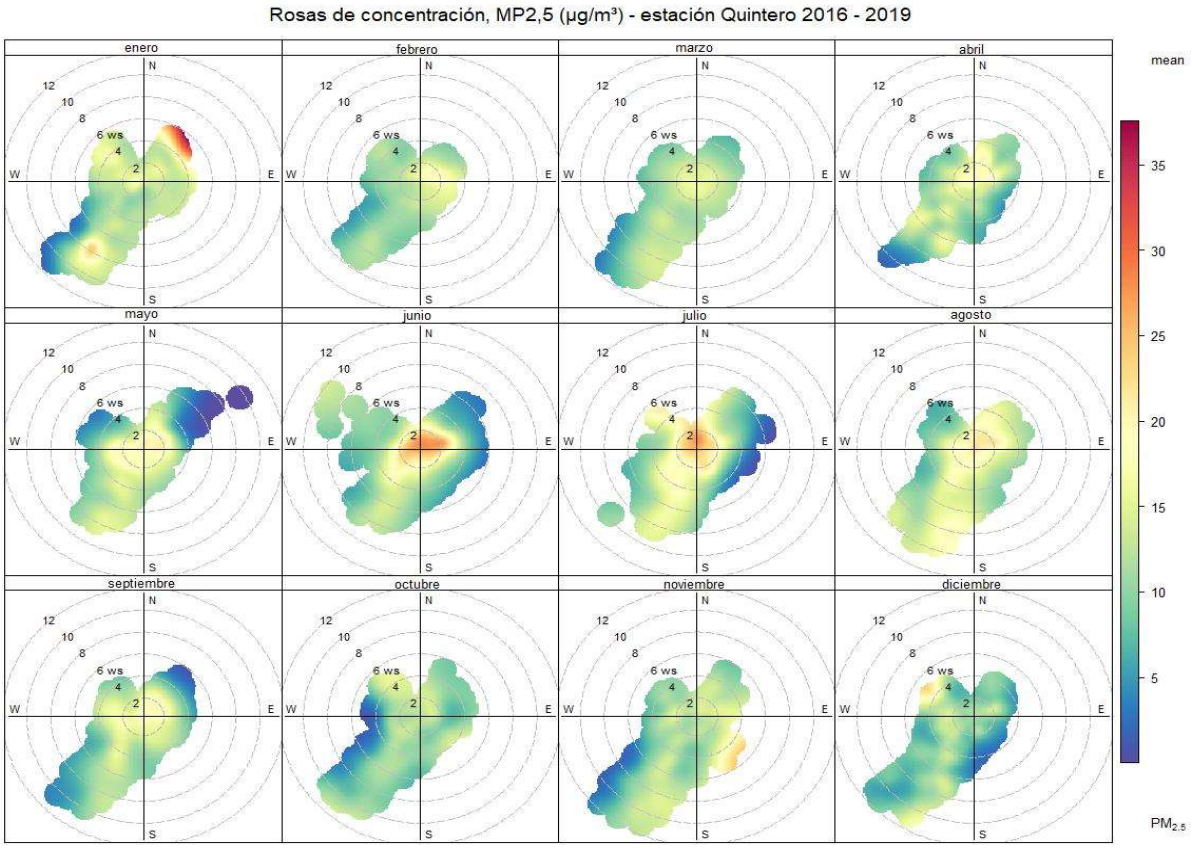
Figura 6-26 Rosas de concentración de MP2,5, Ciclo anual promedio, estación Concón 2016 a 2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

Para Quintero, enero también es el mes con los valores promedios más altos de MP2,5 (35 µg/m^3 aproximadamente), valores asociados a vientos provenientes del noreste de 6 m/s.

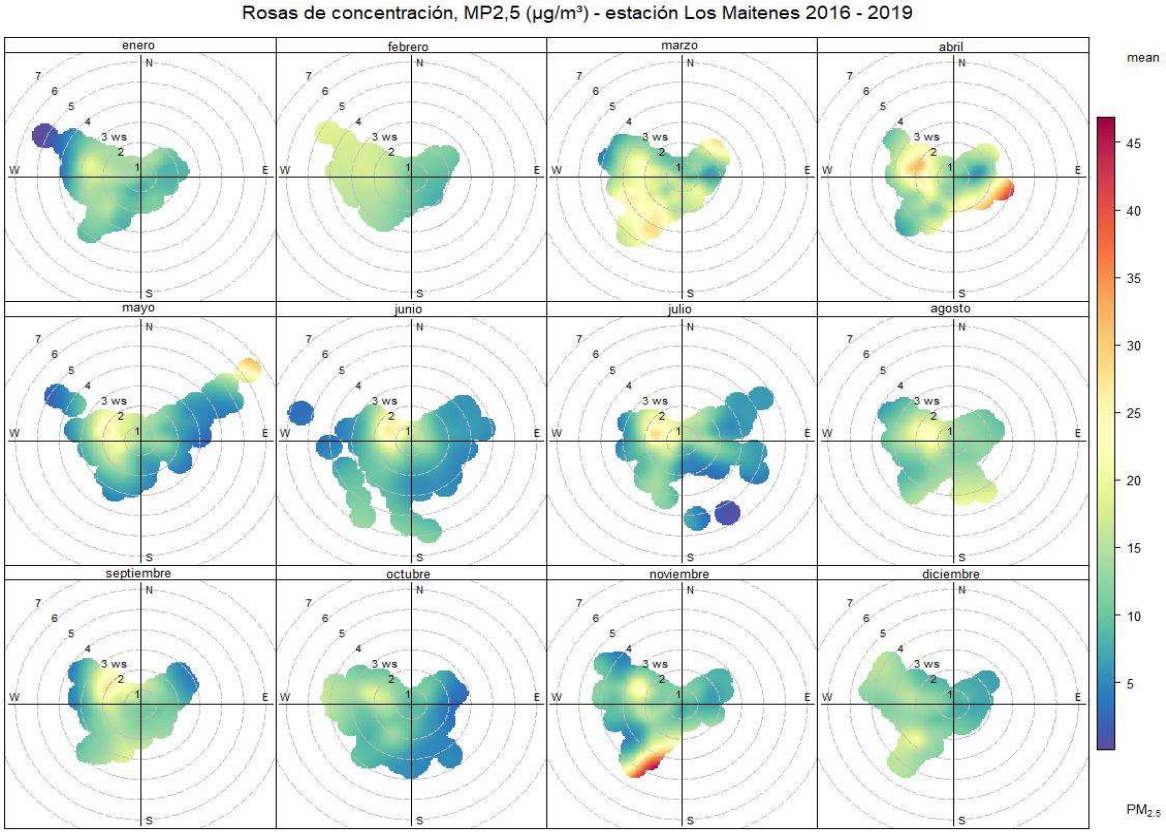
Figura 6-27 Rosas de concentración de MP2,5, Ciclo anual promedio, estación Quintero 2016 a 2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

Para Los Maitenes, abril y noviembre presentan los valores promedios más altos de MP2,5 (45 µg/m^3 aproximadamente), asociando vientos provenientes del este-sureste (de 3 m/s) y suroeste (de 4 m/s), respectivamente.

Figura 6-28 Rosas de concentración de MP2,5, Ciclo anual promedio, estación Los Maitenes 2016 a 2019



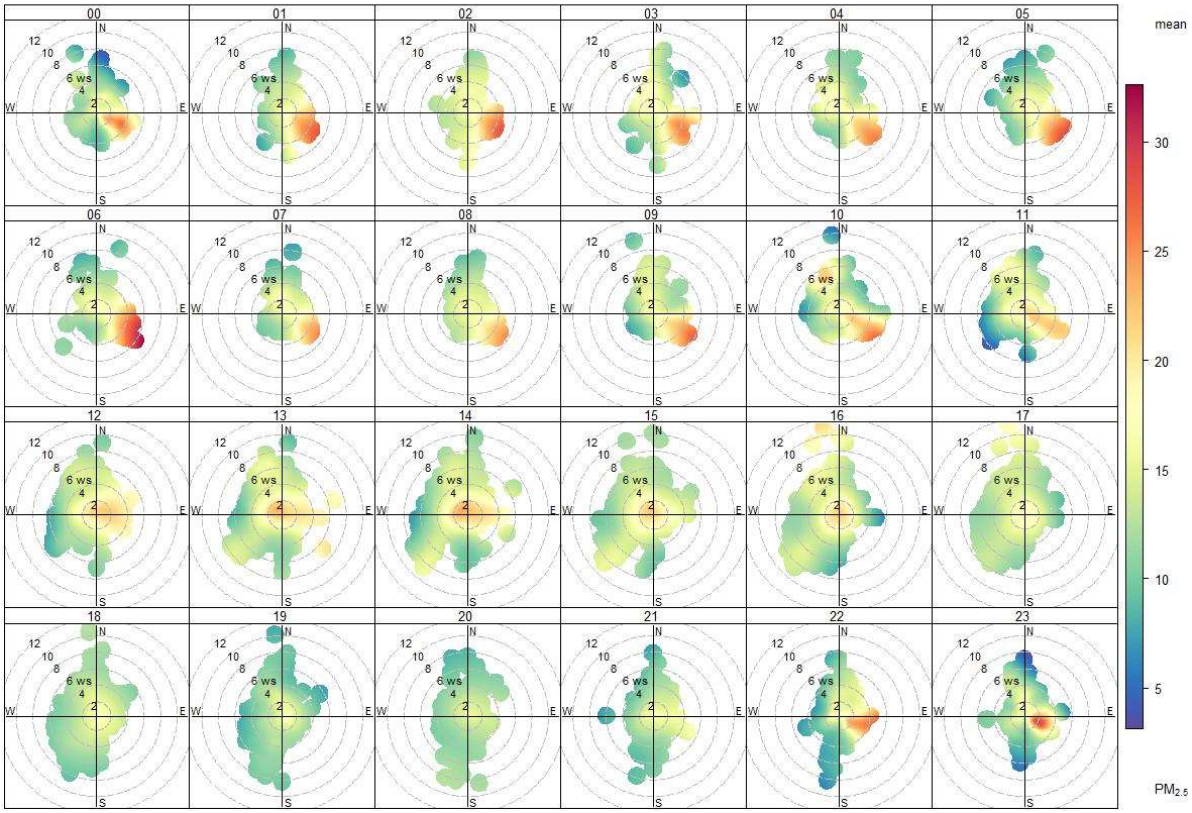
Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

6.2.7.3 Ciclo diario promedio

Las figuras siguientes corresponden a un arreglo matricial de rosas horarias para construir un día promedio, donde cada hora corresponde al promedio de la hora entre 2016 y 2019. Al igual que las rosas anuales y mensuales, las rosas horarias fueron generadas con la aplicación OpenAir. Cada rosa de concentración presenta la concentración de MP2,5 en escala de colores, la dirección desde donde viene el viento y su magnitud (ws en m/s) en forma de distancia radial.

En la estación Concón, el valor promedio más alto de MP2,5 (30 µg/m³ aproximadamente) se da a las 6 de la mañana, con brisa tierra-mar del Sureste, de 4 a 6 m/s. Las mayores concentraciones se observan entre las 10 de la noche y las 10 de la mañana, asociando vientos del Sureste.

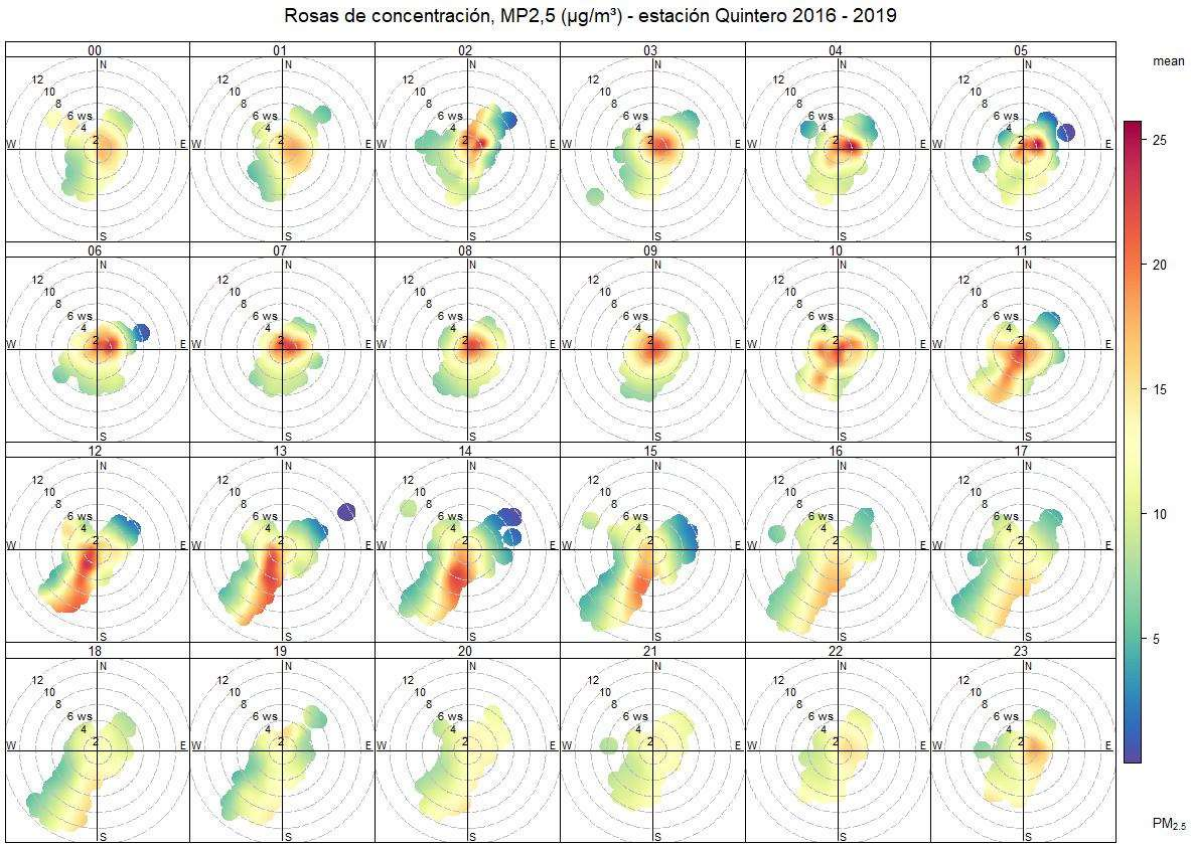
Figura 6-29 Rosas de concentración de MP2,5, Ciclo diario promedio, estación Concón 2016 a 2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

En la estación Quintero, los valores promedios más altos de MP2,5 (25 µg/m³ aproximadamente) se pueden dar en varios horarios, en la madrugada, parte de la mañana o primeras horas de la tarde, con vientos del Este, Calmas y Suroeste, respectivamente.

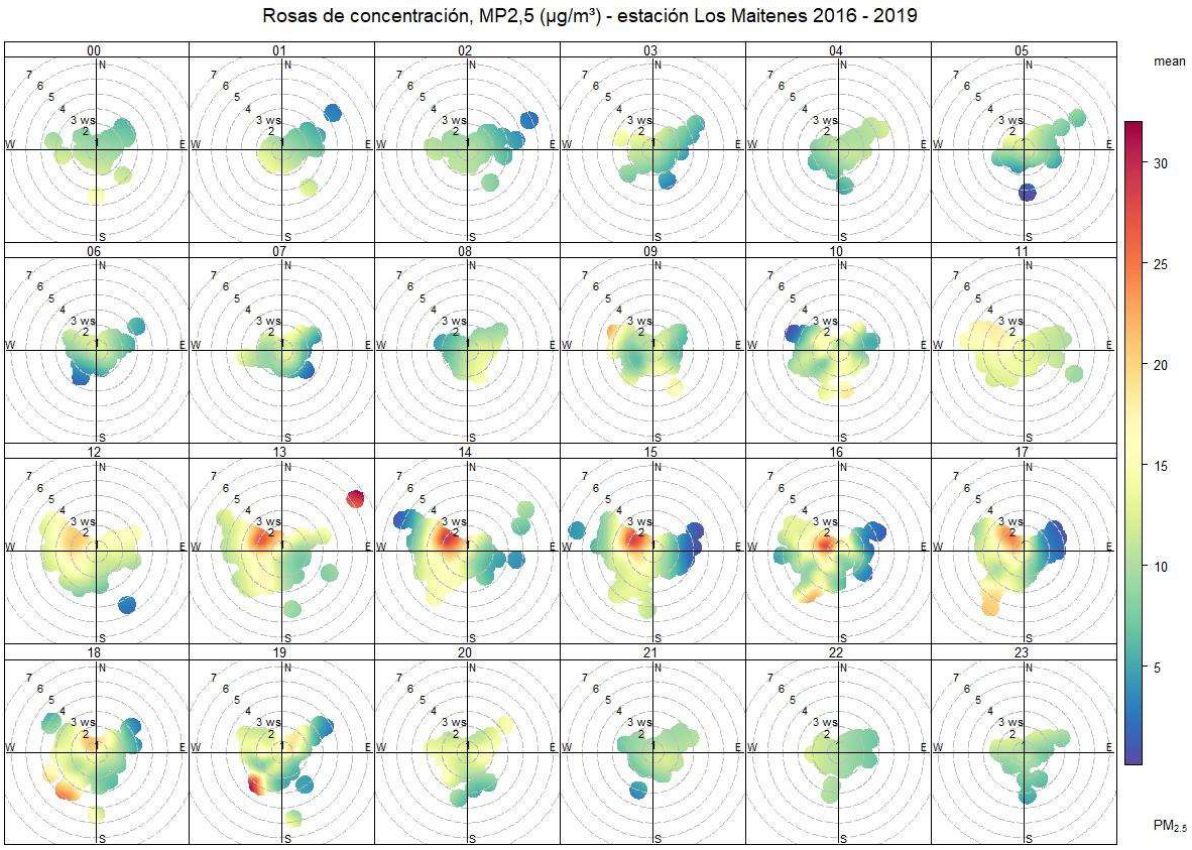
Figura 6-30 Rosas de concentración de MP2,5, Ciclo diario promedio, estación Quintero 2016 a 2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

En la estación Los Maitenes, los valores promedios más altos de MP2,5 (30 µg/m^3 aproximadamente) se pueden dar durante la tarde, entre las 13 y 19 hrs, con vientos provenientes del Noroeste principalmente, o Suroeste, de 2 a 3 m/s.

Figura 6-31 Rosas de concentración de MP2,5, Ciclo diario promedio, estación Los Maitenes 2016 a 2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

Conclusión: Se presentan en las tablas siguientes, rangos de variables de estos gráficos polares, que consideran valores promedios de 4 años. La información es consistente con los análisis anteriores, y precisan también horarios en que se observan las mayores concentraciones de SO_2 y MP2,5.

Para rangos de magnitud del viento se debe considerar la siguiente escala:

Tabla 6-1 Escala clasificación del viento

Clasificación del viento	**Rango velocidad (m/s)**
Calma	<1
Débil	1-2
Ligera	3-6
Moderada	7-10
Fuerte	>10

Fuente: Elaboración propia. Tabla simplificada considerando Escala Beaufort

Las Tabla 6-2y Tabla 6-3 para ciclo diario y anual de SO_2 indican que para las estaciones de Concón y Quintero, las mayores concentraciones se dan en el periodo frío, con brisa nocturna de componente SE en Concón y ENE en Quintero de intensidad débil a ligera. En Los Maitenes las mayores concentraciones se pueden observar en cualquier época del año, pero durante el día (brisa diurna), con una componente del viento WNW de intensidad débil a ligera.

Tabla 6-2 Rangos promedios observados en gráficos polares ciclo diario de SO_2

Estación	Concentración promedio horario SO_2 (μ/m^3N)	Rango hora (horas del día)	Dirección del viento	Rango magnitud del viento (m/s)
Concón	SO_2>150	23 a 11 H.L.	SE/ESE	2-6
Quintero	SO_2>100	23 a 10 H.L	ENE	0-2
Los Maitenes	SO_2>100	09 a 17 H.L	WNW	1-3

Fuente: Elaboración propia con datos MMA

Tabla 6-3 Rangos promedios observados en gráficos polares ciclo anual de SO_2

Estaciones	Concentración promedio mensual SO_2 (μ/m^3N)	Rango meses	Rango dirección del viento	Rango magnitud del viento (m/s)
Concón	SO_2>150	abril-septiembre	SE	4-6
Quintero	SO_2>150	abril-septiembre	ENE	2-3
Los Maitenes	SO_2>120	cualquier mes del año	WNW	2-3

Fuente: Elaboración propia con datos MMA

La Tabla 6-4 y Tabla 6-5 para ciclo diario y anual de MP2,5 no muestran señales claras de comportamiento como el SO_2, y los valores de concentraciones son en general bajos.

Respecto al ciclo diario, Concón presenta mayores valores durante la noche, con vientos del SE de intensidad ligera. Quintero es más variable, y los mayores valores pueden observarse desde la madrugada hasta primeras horas de la tarde, con vientos débiles de componente Este en la madrugada y mañana; ligeros a moderados en la tarde de componente SW. Los Maitenes presenta mayores concentraciones durante el día, con vientos débiles a ligeros de componente NW.

Tabla 6-4 Rangos promedios observados en gráficos polares ciclo diario de MP2,5

Estaciones	Concentración promedio horario MP2,5 (μ/m^3N)	Rango hora (horas del día)	Dirección del viento	Rango magnitud del viento (m/s)
Concón	MP2,5>20	22:00 a 10:00 H.L.	SE	4-6
Quintero	MP2,5>15	00:00 a 09:00 H.L. 13:00 a 15:00 H.L.	E/ENE SW	0-2 2-10
Los Maitenes	MP2,5>20	13:00-19:00 H.L.	NW	2-3

Fuente: Elaboración propia con datos MMA

Respecto al ciclo anual de MP2,5, Concón muestra un máximo en Enero, con viento SW de intensidad ligera a moderada (ya explicado anteriormente en el comentario de la Figura 6-26); Quintero en tanto presenta valores más altos en Enero, Junio y Julio con vientos del NE ligeros y cercanos a la calma en los meses de invierno. Los Maitenes presenta máximos entre Abril y Noviembre, con vientos del ESE en Abril y del SW Noviembre de intensidad ligera.

Tabla 6-5 Rangos promedios observados en gráficos polares ciclo anual de MP2,5

Estaciones	Concentración promedio mensual MP2,5 (μ/m^3N)	Meses	Dirección del viento	Rango magnitud del viento (m/s)
Concón	MP2,5>35	Junio	SE	1-2
Quintero	MP2,5>25	Enero	NE	4-6
		Junio y Julio	NE	0-2
Los Maitenes	MP2,5>35	Abril	ESE	3-4
		Noviembre	SW	3-4

Fuente: Elaboración propia con datos MMA

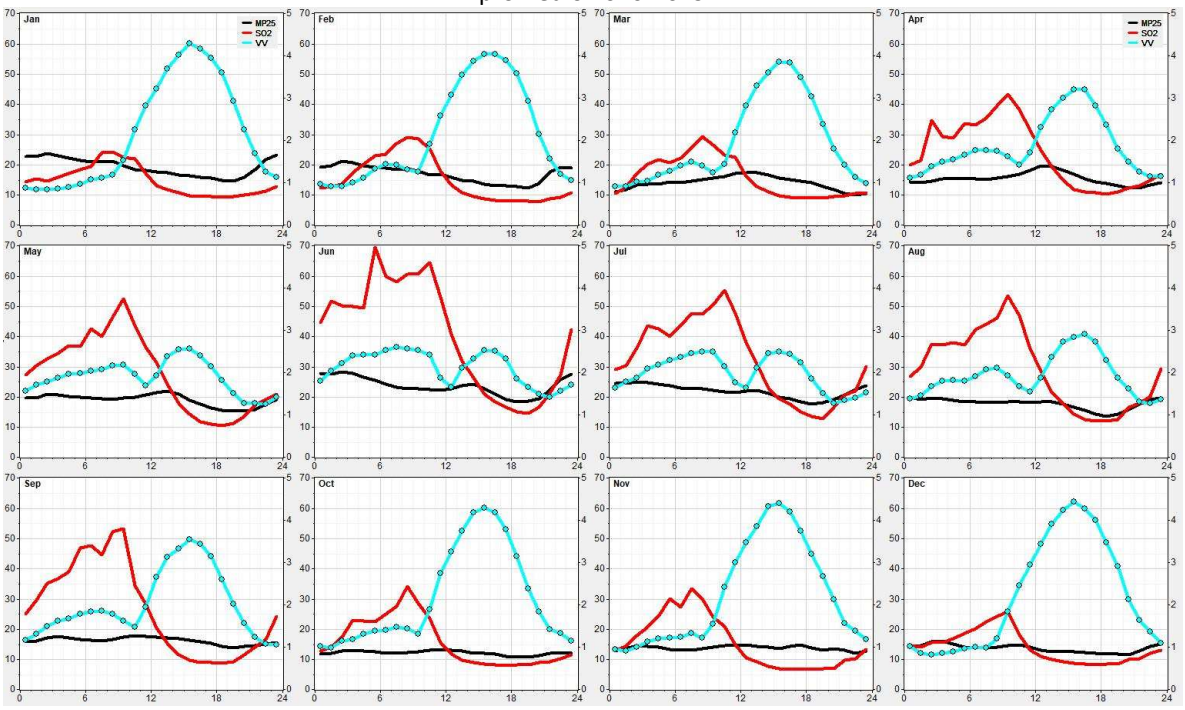
6.2.8 Ciclo diario mensual conjunto para SO_2 y MP2,5 v/s magnitud del viento

Para ver la relación entre las concentraciones de SO_2 y MP2,5 se analizan ciclos diarios mensuales de SO_2 y MP2,5 v/s magnitud del viento para las estaciones de Concón, Quintero y Los Maitenes. Cada Figura corresponde a un arreglo matricial que incluye gráficos de ciclos diarios para cada mes del año, promedio de los años 2016-2019.

Los valores de MP2,5 muestran en general escasa variabilidad durante el año y durante el día, dificultando la relación que pudiera darse con el SO_2, mientras que en Los Maitenes sí existe cierta relación.

De acuerdo a la Figura 6-32 para Concón, el MP2,5 muestra un ligero incremento en junio, con valores en torno a 30 µg/m^3 a la medianoche, con magnitudes del viento del orden de 2 m/s. Respecto al SO_2, los máximos promedios diarios mensuales para este período, se observan entre abril y septiembre, con un máximo en junio (65 µg/m^{3}aproximadamente) alrededor de las 10 de la mañana, con vientos del orden de 2 m/s.

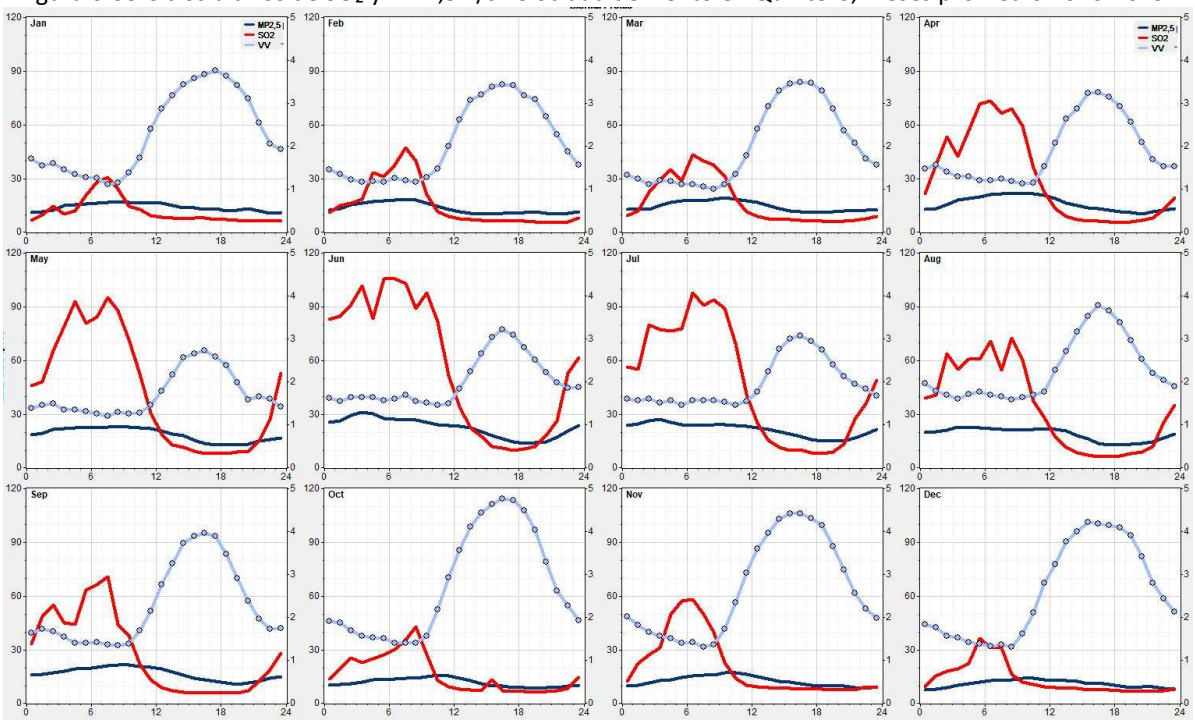
Figura 6-32 Ciclos diarios de SO_2 (µg/m^{3}N) y MP2,5 (µg/m^{3}N) v/s velocidad de viento (m/s) en Concón, meses promedio 2016-2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir.
La línea roja corresponde al SO_2, la negra al MP2,5 y la celeste a la Magnitud del viento.

Para Quintero el MP2,5 muestra un ligero incremento en junio, con valores en torno a 30 µg/m^3 en la madrugada con magnitudes del viento del orden de 1.5 m/s. Respecto al SO_2, los promedios máximos diarios mensuales para este período, se observan entre abril y julio, con un máximo en junio (110 µg/m^{3}aproximadamente) alrededor de las 6 de la mañana, y viento con una magnitud del orden de 1.5 m/s.

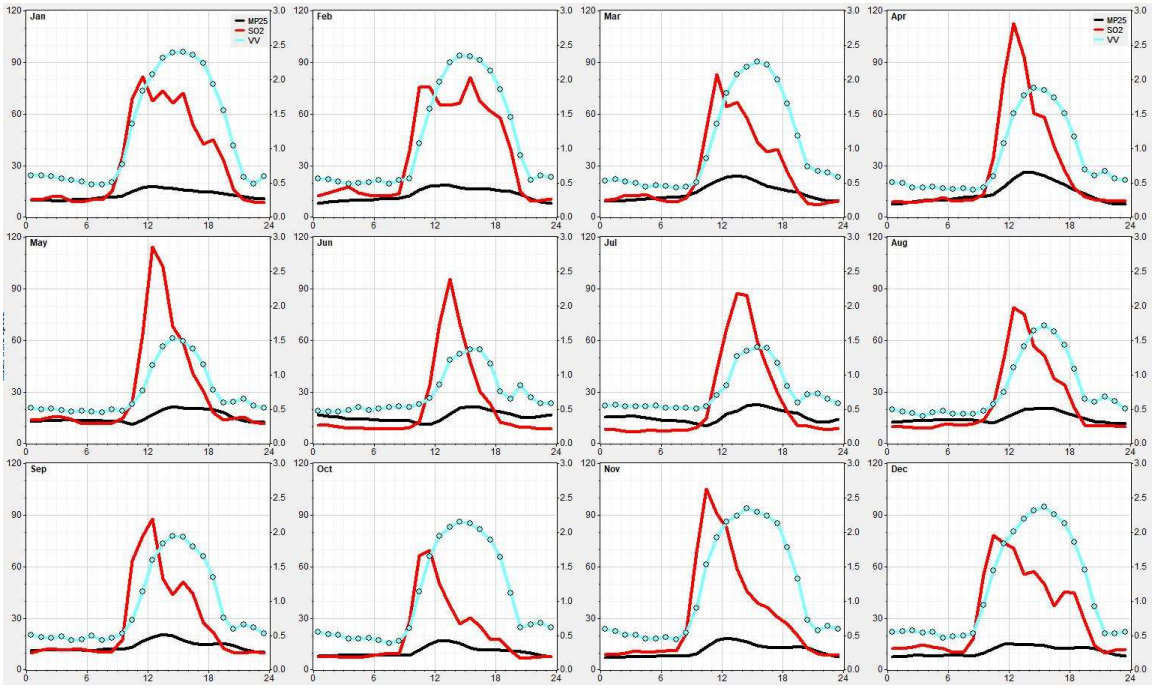
Figura 6-33 Ciclos diarios de SO_2 y MP2,5 v/s velocidad de viento en Quintero, meses promedio 2016-2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir.
La línea roja corresponde al SO_2, la azul gruesa continua al MP2,5 y la celeste a la Magnitud del viento.

Para el caso de Los Maitenes, existe una relación entre SO_2, MP2,5 y magnitud del viento, con ciclos similares, observándose máximos de SO_2 y MP2,5 entre el mediodía y las 4 de la tarde, siendo más notorios (de mayor duración) los máximos de SO_2 en los meses de verano (del orden de 80 µg/m^3), y más altos en otoño-invierno (del orden de 110 µg/m^3).

Figura 6-34 Ciclos diarios de SO_2 y MP2,5 v/s velocidad de viento en Los Maitenes, meses promedio 2016-2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MMA y OpenAir

Conclusión: La tabla siguiente resume la información de los gráficos anteriores que muestran los ciclos diarios mensuales promedios de SO_2 y MP2,5 v/s la magnitud del viento.

Se resume la información en función de las máximas concentraciones de estos dos contaminantes, a fin de vislumbrar si estos valores coinciden en los horarios o meses en que se producen.

- En cuanto a los meses de coincidencia entre máximos de SO_2 y MP2,5 en la estación de Concón, se puede decir se dan preferentemente en el mes de Junio con viento débil (aunque el SO_2 se extiende entre Abril y Septiembre). Los horarios de los máximos son diferentes.
- En Quintero, se repite el patrón de máximas concentraciones de los dos contaminantes durante el invierno, siendo Junio y Julio los meses en común, con vientos también débiles. Las horas de coincidencia corresponden a la madrugada (aunque el SO_2 se extiende hasta cerca del mediodía).
- En Los Maitenes, los máximos de SO_2 pueden darse en cualquier época del año, en cambio el MP2,5 es ligeramente más alto en Marzo y Abril. Los horarios de estos máximos sí son similares, entre las 12 y las 16:00 hrs, también asociados a viento débil.

Tabla 6-6 Comparación entre ciclos diarios mensuales de concentraciones de SO_2 y MP2,5 en función de la magnitud del viento

Estación	Ciclo diario mensual	Mayores concentraciones ($\mu g/m^3N$)	Hora máxima concentración	Magnitud del viento (m/s)
Concón	SO_2	Entre Abril y Septiembre, máximo en Junio	10:00 H.L.	1-2,5
	MP2,5	En Junio	00:00 H.L.	del orden de 1,5
Quintero	SO_2	Entre Abril y Julio	23:00 a 11:00 H.L	del orden de 1,5
	MP2,5	Junio-Julio	00:00 a 05:00 H.L.	del orden de 1,5
Los Maitenes	SO_2	Todo el año, más altos en Abril y Mayo, y mayor duración en verano	12:00 a 16:00 H.L	0,5-2,5
	MP2,5	Ligeramente más altos en Marzo y Abril	12:00 a 16:00 H.L	0,5-2,5

Fuente: Elaboración propia con datos MMA

6.3 Resumen General del comportamiento del SO_2 y los rangos de variación de variables relevantes

La Tabla siguiente contempla el resumen de los gráficos polares de SO_2 y otros datos de referencia.

Tabla 6-7 Resumen comportamiento del SO_2 2016-2019 considerando los gráficos polares y otros datos de referencia

Estación	Dato Referencia Orientación estación respecto a fuentes	Distancia aproximada a fuente principal (ENAP o CDV) (km)	Vientos predominantes y horas del día (hrs) (*)[72]	Señal anual del viento asociado a mayores concentraciones SO_2	Señal mensual del viento asociado a mayores concentraciones SO_2	Valor Promedio Concentración SO_2 (μ/m^3N)	Rango hora (hrs) en que se puede presentar un incremento SO_2	Rango dirección del viento asociado a incremento SO_2	Rango magnitud del viento(m/s) asociado a incremento SO_2
Colmo	Al E de ENAP	6.1	NE / E (00 a 10) W / NW (11 a 22)	SW otros años NW 2017	septiembre	9	09 a 11	W/WSW	2-6
Concón	Al WNW de ENAP	0.8	SE (0 a 09) NW / W / SW (10 a 19)	SE	abril-septiembre	23	23 a 11	SE/ESE	2-6
J Vecinos	Al SW de ENAP	2.1	S / SE (20 a 08) NW / SW (09-18)	N/NE	junio	8	08 a 09 y 21	NE/NNE	2-5
Las Gaviotas	Al NE de ENAP	2.6	E (00 a 10) W / NW (11 a 21)	NNW 2016 y 2019 SW otros años	marzo y diciembre	12	09 a 10, 13 a 14	W/SW	2-6
Puchuncaví	Al NE de AES Gener y CODELCO Ventanas CDV	8.7	NE (20 a 09) W / NW / SW (10 a 19)	WSW	cualquier mes del año	15	04 y 10 a 19	SW	2-4
La Greda	Al E de AES Gener Al NE de CDV	1.9	NE / E (21 a 09) W / SW (10 a 19)	SSW	julio-agosto, octubre	15	18 a 21	SW/SSW	2-5
Los Maitenes	Al SE de AES Gener y CDV	2.7	E (21 a 08) W (10 a 19)	W	cualquier mes	28	09 a 17	WNW	1-3
Ventanas	Al N de AES	2.6	NE (22 a 08)	S	junio-julio	15	05 y 22 a	S	2-4

[72] (*) En anexos se pueden encontrar las RV para todas las estaciones, periodo 2016-2019.

Estación	Dato Referencia Orientación estación respecto a fuentes	Distancia aproximada a fuente principal (ENAP o CDV) (km)	Vientos predominantes y horas del día (hrs) (*)[72]	Señal anual del viento asociado a mayores concentraciones SO_2	Señal mensual del viento asociado a mayores concentraciones SO_2	Valor Promedio Concentración SO_2 (μ/m^3N)	Rango hora (hrs) en que se puede presentar un incremento SO_2	Rango dirección del viento asociado a incremento SO_2	Rango magnitud del viento(m/s) asociado a incremento SO_2
	Gener y CDV		SW (10 a 20)				23		
Centro Quintero	Al SW de CDV y AES Gener	5.4	NE / E / SE (20 a 07) NW (08 a 13) SW (15 a 19)	CALMA	abril-septiembre, noviembre	22	04 a 11	CALMA	CALMA
Loncura	Al SW de AES Gener y CDV	3.6	E/NE (21 a 08) SW (10 a 19)	NE	enero-febrero, mayo-julio	10	01 a 06	NE	4-7
Sur	Al S de AES Gener y CDV	4.2	NE (21 a 08) SW (10 a 20)	SE 2016 NE 2017	julio	22	11 a 15	NE	4-6
Valle Alegre	Al SE de AES Gener y CDV	6.5	NE (21 a 09) SW (11 a 19)	W E 2018	febrero-junio	15	10 a 16	WNW	0-2
Quintero	Al WSW/SW de CDV y AES Gener	5.1	NE (02 a 09) SW (11 a 00)	ENE	abril-septiembre	28	23 a 10	ENE	0-3
Torre Meteorológica Principal			E (21 a 09) W/SW (10 a 20)	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia con datos MMA y resultados del estudio

Respecto a incrementos en las concentraciones y la relación entre estaciones, considerando la tabla anterior, se puede mencionar que:

- Colmo y Las Gaviotas, estaciones más interiores, son más influenciadas en sus concentraciones por vientos mar-tierra.
- Concón y Junta de Vecinos, estaciones cerca del borde costero, están más propensas a un aumento de las concentraciones con flujos tierra-mar durante el periodo nocturno.
- Puchuncaví, Los Maitenes, Valle Alegre y La Greda, aumentan sus concentraciones en momentos de brisa mar-tierra durante la tarde; las 3 primeras por estar más al interior, y La Greda por su ubicación al E de las fuentes.
- Centro Quintero y Quintero, pese a estar muy cerca, la primera se ve más influenciada en momentos de viento Calma, mientras que Quintero con vientos nocturnos tierra-mar.
- Ventanas, con dos fuentes muy próximas al sur, se ve más expuesta con viento sur débil durante la noche, probablemente por recirculación.
- Loncura en tanto, se ve afectada por viento moderado del NE durante la madrugada.
- Sur presenta incrementos con viento componente N al aproximar un sistema frontal, y también del SE probablemente por recirculación.

7 Producto vi. Categorización de las condiciones de ventilación en términos de "Bueno, Regulares y Malas”

Producto resultante: A partir de rangos de variación de las variables se definen valores críticos de dichas variables, estableciéndose una categorización de las condiciones de ventilación, un Factor Meteorológico, en términos de Bueno, Regular y Malo.

7.1 Datos y métodos

Se integra la información de análisis y resultados de Productos iii, iv y v de este informe.

Se incorpora información conceptual como el Factor de Ventilación (FV), Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA) y características de la pluma a niveles bajos.

Se determinan categorías asociadas a un Factor Meteorológico, que integra las variables meteorológicas locales y sus rangos de variación, con las configuraciones sinópticas y de mesoescala, para el período frío (Abril-Septiembre) y cálido (Octubre-Marzo).

El Factor Meteorológico se obtiene en términos de Bueno, Regular y Malo para las 3 comunas contempladas en el estudio: Concón, Quintero y Puchuncaví, representadas por las estaciones que se asocian a la condición relevante (los registros más altos en cuanto a concentraciones) y que corresponde a las estaciones de monitoreo Concón, Quintero y Los Maitenes.

7.1.1 Factor de ventilación

Como se ha visto en los capítulos anteriores, la variabilidad respecto al ciclo diario y estacional que presentan las configuraciones de mesoescala y escala local, inciden en el comportamiento de diversos parámetros, entre ellos, la dirección y magnitud del viento a niveles bajos. La altura de la capa de mezcla y el viento medio dentro de la capa definen el Factor de Ventilación (FV).

Las configuraciones meteorológicas de escala sinóptica y mesoescala que se presentan en la zona de estudio son las mismas para las tres comunas, sin embargo, el comportamiento de las condiciones a escala local difiere en el transcurso del día, principalmente en lo referido a estabilidad y viento a niveles bajos.

Por otra parte, la altura de la capa de mezcla marina (CMM) definida por la base de la inversión térmica de subsidencia y las inversiones térmicas radiativas, presentan variabilidad respecto a su ciclo diario. La inversión térmica por enfriamiento nocturno normalmente disipa en las primeras horas de la mañana por el calentamiento diurno, en tanto la altura de la CMM típicamente aumenta en el transcurso del día, sin embargo, su comportamiento es más complejo al depender de un número mayor de variables. El calentamiento diurno asocia turbulencia térmica y mecánica que redunda en el aumento de la altura de la CMM, pero en oportunidades este proceso podría

verse inhibido o anulado, como en las fases de formación y culminación de las vaguadas o bajas costeras. En estas etapas de la evolución de las vaguadas costeras, la subsidencia asociada a la presencia de una dorsal en altura se ve incrementada por la subsidencia forzada en la ladera andina occidental, haciendo descender la CMM en algunos casos hasta el nivel de superficie.

El método más ampliamente usado para determinar un índice de remoción de contaminantes es el Factor de Ventilación, donde:

FV= V*H (m^2/s)
V= Viento medio dentro de la capa de mezcla (m/s)
H= Altura de la capa de mezcla (m)

Mientras mayor sea el producto resultante de V*H (m^2/s) el Factor de Ventilación será más favorable para la remoción de contaminantes.

.

Tabla 7-1 Factor de ventilación FV

Rango VI (m^2/s)	**Categoría**
0 a 1175	Pobre
1176 a 2350	Marginal
2351 a 3525	Moderado
> 3525	Buena

Fuente: Ferguson et al 2003

Tabla 7-2 Clasificación del Índice de Ventilación (FV)

V/H	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
1,0	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
2,0	100	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
3,0	150	300	600	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000	3300	3600	3900	4200	4500
4,0	200	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200	3600	4000	4400	4800	5200	5600	6000
5,0	250	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500
6,0	300	600	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5400	6000	6600	7200	7800	8400	9000
7,0	350	700	1400	2100	2800	3500	4200	4900	5600	6300	7000	7700	8400	9100	9800	10500
8,0	400	800	1600	2400	3200	4000	4800	5600	6400	7200	8000	8800	9600	10400	11200	12000
9,0	450	900	1800	2700	3600	4500	5400	6300	7200	8100	9000	9900	10800	11700	12600	13500
10,0	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000
11,0	550	1100	2200	3300	4400	5500	6600	7700	8800	9900	11000	12100	13200	14300	15400	16500
12,0	600	1200	2400	3600	4800	6000	7200	8400	9600	10800	12000	13200	14400	15600	16800	18000
13,0	650	1300	2600	3900	5200	6500	7800	9100	10400	11700	13000	14300	15600	16900	18200	19500
14,0	700	1400	2800	4200	5600	7000	8400	9800	11200	12600	14000	15400	16800	18200	19600	21000
15,0	750	1500	3000	4500	6000	7500	9000	10500	12000	13500	15000	16500	18000	19500	21000	22500

Fuente: Elaboración Propia a partir de Informe CENMA 2013[73]

La Tabla 7-2 Clasificación del Índice de Ventilación (FV)Tabla 7-2 muestra la relación entre la altura de la capa de mezcla “H” (fila superior), el viento medio “V” dentro de la capa (primera columna), y el Factor de Ventilación resultante que resulta del producto de V*H. El área roja de la Tabla está asociada a un FV Malo (Pobre en la Tabla 7-1), el área amarilla a un FV Regular (Marginal a Moderado en la Tabla 7-1), y el área verde a un FV Bueno (Bueno en laTabla 7-1).

[73]Informe CENMA para Codelco División Ventanas. Marzo 2013

Si se cuenta con las variables requeridas: la altura de la capa de mezcla (H) y el viento medio dentro de la capa (V), se puede determinar cuantitativamente el Factor de Ventilación (FV) y la capacidad de remoción de los contaminantes.
Actualmente en la zona de estudio no hay un perfilador vertical que registre y envíe esta información en línea; sería de gran utilidad contar con un equipo de esas características para el análisis y seguimiento de las condiciones meteorológicas de ventilación y para contrastar y calibrar los resultados que entreguen los modelos numéricos de pronóstico que se operen para esta zona.

Los tres rangos de esta Tabla son los siguientes[74]:

Tabla 7-3 Rangos para Factor de ventilación

Rango	Categoría	Factor de Ventilación
FV<1.175 m²/s	1	Malo
1.175 m²/s ≤FV<3525 m²/s	2	Regular
FV≥3525 m²/s	3	Bueno

Fuente: Elaboración propia considerando la Tabla 7-2

7.1.2 Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA)

El Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA) corresponde a un indicador que relaciona las condiciones meteorológicas con la calidad del aire esperada y es inversamente proporcional al Factor de Ventilación después del mediodía[75]; esto significa que cuando el rango del FV aumenta de rango, el PMCA disminuye su categoría.

Para tener información en línea del Factor de Ventilación, se requeriría contar con las variables requeridas para su cálculo, un perfilador vertical en la zona de estudio que registre hora a hora la altura de la capa de mezcla y el viento medio dentro de la misma. Idealmente que registre también la temperatura, de manera de poder determinar las características del gradiente térmico vertical (GTV), importante para estimar el comportamiento de la pluma y su probable impacto viento abajo de las fuentes emisoras de contaminantes.[76]

Como no se cuenta con esta información, se utilizará el PMCA desarrollado a partir del análisis de las configuraciones de escalas sinóptica y regional, más los rangos cuantitativos de las variables relevantes a distintas escalas y que finalmente inciden en las condiciones de ventilación a niveles bajos.

De esta manera, el PMCA queda caracterizado por 3 categorías asociadas a los índices meteorológicos de ventilación Bueno, Regular y Malo, categorizando finalmente el "Factor

[74]Elaboración propia. Los rangos son referenciales y deben irse ajustando para las diferentes localidades de pronóstico mediante métodos estadísticos y la operación de un perfilador vertical.
[75]Rutllant J., Salinas H., Caracterización meteorológica de situaciones de alto potencial de contaminación atmosférica en Chile Central
[76]Bossi M., Matich D., Pignani J.M., Contaminación, Meteorología y Estabilidad Térmica. 2000

Meteorológico". Como el PMCA es inversamente proporcional al Factor de Ventilación que muestra la Tabla 7-4 las categorías asociadas son inversas.

Tabla 7-4 Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA)

PMCA Categoría (Factor Meteorológico)	Índice Meteorológico de Ventilación
1	Bueno
2	Regular
3	Malo

Fuente: Elaboración propia a partir de información de CENMA[77]

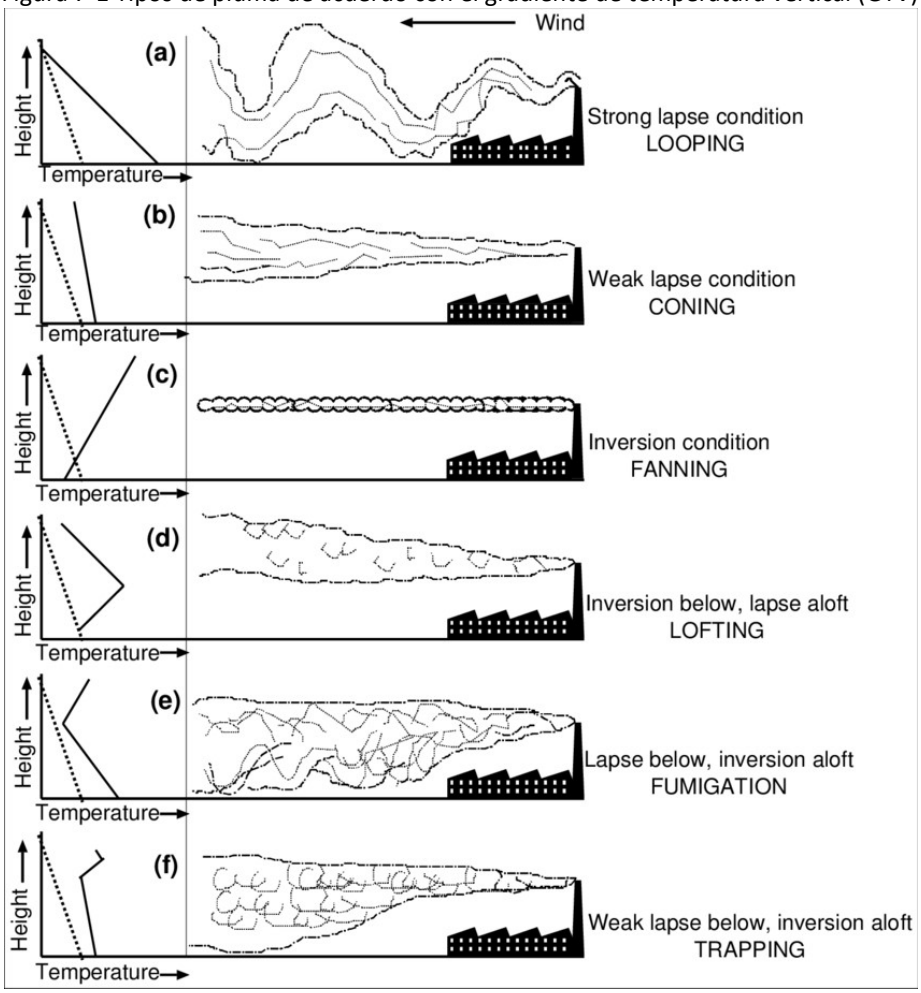
7.1.3 Características de la pluma o penacho, en función de la estabilidad a niveles bajos

Otro concepto importante, pero esta vez para aplicar a la fase operativa de un sistema de pronóstico en la zona, es el reconocimiento del comportamiento de la pluma o penacho.

El perfil del gradiente vertical de temperatura (GTV) en la capa de mezcla, determinaría en buena medida, las características de la pluma o penacho. Una descripción de las distintas configuraciones se detalla a continuación.

[77]Informe CENMA para Codelco División Ventanas enero 2013

Figura 7-1 Tipos de pluma de acuerdo con el gradiente de temperatura vertical (GTV)



Fuente: Bossi M., Matich D., Pignani J.M., Contaminación, Meteorología y Estabilidad Térmica. 2000

Comportamiento de los 6 tipos de plumas bajo diversas condiciones de estabilidad atmosférica. Las líneas punteadas representan el perfil adiabático de temperatura; las líneas continuas, el perfil existente

La Figura 7-1 muestra los distintos tipos de plumas generados por diferentes GTV a niveles bajos cercanos a la superficie.

- La pluma ondulante (looping), ocurre con un GTV inestable en la capa de mezcla, produciéndose vórtices que arrastran la pluma hacia superficie, registrándose altas concentraciones de contaminantes, pero de corta duración. [78]
- La pluma es dispersada por el viento en presencia de un GTV neutral, adquiriendo forma cónica (conning). Típicamente se presenta en horas de la tarde.[79]

[78]Esta configuración podría explicar los altos valores puntuales de SO_2 en diversas estaciones ubicadas al Este de la Bahía.

- La pluma se dispersa en la capa de inversión térmica, (fanning) la que se forma en la noche y primeras horas de la mañana. [80]
- La pluma elevada (lofting) se produce cuando los contaminantes son emitidos sobre una capa de inversión. La pluma se dispersa sobre la inversión la que actúa como barrera e impide que los contaminantes desciendan hacia el suelo.[81]
- La condición de fumigación (fumigation) se presenta cuando la capa turbulenta se eleva desde el suelo por calentamiento, alcanzando a la pluma generada previamente por el proceso fanning, y viento abajo es llevada hasta el nivel del suelo.[82]
- La pluma atrapada (trapping) se genera cuando el contaminante es emitido en una capa no estable de aire y queda atrapado entre el suelo y una capa de inversión. [83]

Si bien las emisiones fugitivas emitidas en la Fundición Ventanas no corresponderían estrictamente al concepto de pluma o penacho emitido desde una chimenea, el comportamiento de estas emisiones si dependen del GTV y del factor de ventilación y en consecuencia pueden tratarse de forma análoga.

7.2 Categorización de las Condiciones de Ventilación, el Factor Meteorológico en términos de "Bueno, Regulares y Malas"

Considerando los rangos de variación de las variables relacionadas con los valores críticos de contaminación y las configuraciones sinópticas y subsinópticas estudiadas, se establece la categorización de las condiciones de ventilación, un Factor Meteorológico en términos de Bueno, Regular y Malo.

El rango de variación de los parámetros asociados a las configuraciones meteorológicas de diferentes escalas, se detallan para los periodos frío y cálido desde la Tabla 7-6 a la Tabla 7-9 que se encuentran a continuación de la Tabla 7.5 Categorización del Factor Meteorológico en términos de "Bueno, Regulares y Malas":

[79]Esta configuración impactaría típicamente estaciones lejanas a la Fundición como Puchuncaví, Valle Alegre
[80]Esta sería la configuración que típicamente impacta a Quintero.
[81]Esta configuración podría explicar, entre otros, impactos en Quintero o Ventanas.
[82]Esta sería una de las configuraciones que durante el día aún con una inversión elevada impactaría Los Maitenes y/o La Greda.
[83]Esta sería una configuración que impactaría sectores ubicados a distancias relativamente distantes, pero menores a las del emplazamiento de Puchuncaví o Valle Alegre.

Tabla 7-5 Categorización del Factor Meteorológico en términos de "Bueno, Regulares y Malas":

Factor de Ventilación **Nivel 1- BUENO**	Factor de Ventilación **Nivel 2- REGULAR**	Factor de Ventilación **Nivel 3- MALO**
PMCA BAJO	PMCA MEDIO	PMCA ALTO
CONCÓN **Representativo de la Comuna de Concón**	**CONCÓN** **Representativo de la Comuna de Concón**	**CONCÓN** **Representativo de la Comuna de Concón**
(SF) Presencia de sistemas frontales. **(VC3)** Vaguada Costera en etapa de disipación.[84] Gradiente de presión costa-valle[85] mayor a 2.0 hPa en el periodo frío (abril-septiembre) y mayor a 4.0 hPa en el periodo cálido (octubre-marzo) CMM>300 m s.n.m. **(PosF)** Condiciones de inestabilidad Postfrontal. Ausencia de inversiones térmicas, ITR o ITS. **(AF)** Presencia de anticiclón frío migratorio en el periodo diurno. (11:00 a 21:00 H.L.), con vientos en superficie de componente OesteNoroeste y magnitud de 4,0 a 8,0 m/s.	**(MA)** Presencia del Anticiclón Semipermanente del Pacífico. Diferencia de temperatura entre el tope y la base de la Inversión térmica de subsidencia (ITS) ≥ 8 °C. Nublado con nubosidad baja. (Estratos, estratocúmulos) Viento nocturno en superficie de componente ESE con una magnitud de 2,0-3,0 m/s. 150≤CMM<300 m s.n.m. **(AF)** Presencia de anticiclón frío migratorio y de inversión térmica radiativa (ITR) asociada a viento en superficie de componente EsteSureste con una magnitud de 3,0-5,0 m/s entre las 23:00 y 11:00	(**VC1 y VC2)** Vaguada Costera en etapas de formación o culminación. La base de la Inversión Térmica de Subsidencia (ITS) se encuentra en superficie o muy cercana a esta, frecuentemente acoplada en la noche y madrugada a una inversión térmica radiativa (ITR). Nubosidad: Despejado o Nubosidad Parcial Alta. Los parámetros meteorológicos que mejor caracterizan a (VC1 y VC2) son anomalías positivas de la temperatura y negativas de la humedad relativa en la troposfera media y baja. Las mayores concentraciones de SO2 se registran entre las 21:00 y 10:00 H.L. cuando la estación de monitoreo se encuentra viento abajo de las principales fuentes que emiten contaminantes, y que se ubican al EsteSureste de la estación. Los episodios se presentan principalmente en el periodo abril-octubre. **(MA)** Presencia del Anticiclón Semipermanente del Pacífico con una reducida CMM. La base de la Inversión Térmica de Subsidencia (ITS) se sitúa bajo 150 m s.n.m., escasa nubosidad, asociada a una inversión térmica radiativa (ITR). Las anomalías positivas de la temperatura y negativas de la humedad relativa en la troposfera media y baja caracterizan a esta configuración. Dorsal en 500 hPa con marcada vorticidad anticiclónica e índice de circulación zonal bajo.

[84]Con Advección de nubosidad baja estratos/estratocúmulos viento ligero de componente Oeste/Noroeste y ascenso de la CMM

[85] Diferencia de presión (reducida al nivel medio del mar) entre Santo Domingo y Pudahuel a las 14:00 H.L

Factor de Ventilación **Nivel 1- BUENO**	Factor de Ventilación **Nivel 2- REGULAR**	Factor de Ventilación **Nivel 3- MALO**
PMCA BAJO	PMCA MEDIO	PMCA ALTO
(NF) Irrupción de Núcleo Frío o Baja Segregada en altura a la Zona Central. Ascenso de la base de la ITS, nublado con nubosidad baja del tipo cúmulos y estratocúmulos. **(MA)**. Presencia del Anticiclón Semipermanente del Pacífico, cubierto con nubosidad baja. (Estratos y Estratocúmulos) vientos en superficie ligeros a moderados en el día. Gradiente de presión costa-valle[86] mayor a 2.0 hPa en el periodo frío (abr-septiembre) y mayor a 4.0 hPa en el periodo cálido (octubre-marzo) CMM>500 m.s.n.m. **Considerando emisiones normales de Anhídrido Sulfuroso (sin fallas operacionales o aumento anómalo de éstas), se asociaría a valores horarios de concentraciones de SO_2<350 µg/m³N**	***Considerando emisiones normales de Anhídrido Sulfuroso (sin fallas operacionales o aumento anómalo de éstas), se registrarían valores horarios:350 µg/m³N ≤SO_2<500 µg/m³N***	**(AF)** Presencia del alta fría, formación de inversión térmica radiativa por enfriamiento nocturno, asociada a cielo mayormente despejado y viento de componente EsteSureste con una magnitud entre 02 y 04 m/s. Anomalías positivas de la presión en superficie y negativas de la temperatura en 925 hPa caracterizan a esta configuración. **(FA)** Frente en altura. La base de la Inversión Térmica de Subsidencia (ITS) se presenta en SFC asociando marcada estabilidad a niveles bajos, atmósfera mayormente seca o no saturada en la troposfera media y baja, cubierto con nubosidad media y alta.[87] (Condición con características BPF, similar a condiciones de empeoramiento prefrontal del factor de ventilación) ***Episodios de Alerta (SO_2≥500 µg/m³N) o mayores respecto al valor horario, se registrarían en Concón típicamente entre abril y Septiembre; en horas del periodo comprendido entre 21:00 y 10:00 H.L.*** ***Lo anterior, considerando emisiones normales de Anhídrido Sulfuroso (sin fallas operacionales o aumentos anómalos de las emisiones en las principales fuentes que emiten contaminantes.***

[86] Diferencia de presión (reducida al nivel medio del mar) entre Santo Domingo y Pudahuel a las 14:00 H.L
[87] Altocúmulos/Altoestratos/ Cirrus

Factor de Ventilación **Nivel 1- BUENO**	Factor de Ventilación **Nivel 2- REGULAR**	Factor de Ventilación **Nivel 3- MALO**
PMCA BAJO	PMCA MEDIO	PMCA ALTO
LOS MAITENES **Representativo de la comuna de Puchuncaví** **(SF)** Paso de sistemas frontales. **(PosF)** Condiciones PostFrontales **(AF)** Presencia y paso de anticiclón frío migratorio **(NF)** Irrupción de Núcleos Fríos (Bajas Segregadas en altura) a la Zona Central. **(MA**) Presencia del Anticiclón Semipermanente del Pacífico Cubierto con nubosidad baja. (Estratos Estratocúmulos), vientos en superficie débiles a moderados de componente W/WNW 2,0 a 4,0 m/seg y CMM>1500 m.s.n.m.	**LOS MAITENES** **Representativo de la comuna de Puchuncaví** **(MA)** Presencia del Anticiclón Semipermanente del Pacífico. Diferencia de temperatura entre el tope y la base de la Inversión Térmica de Subsidencia ≥ 8 °C. Viento débil en superficie el día de componente OesteNoroeste con una magnitud de 1,0-2,0 m/s. 150≤CMM<300 m **(NF)** Núcleo Frío o baja segregada en altura irrumpiendo en el Norte Chico quedando la zona central en el borde sur del NF.[88]	**LOS MAITENES** **Representativo de la comuna de Puchuncaví** **(VC1 y VC2)** Vaguada Costera en etapas de formación o culminación. La base de la Inversión Térmica de Subsidencia (ITS) se encuentra en superficie o muy cercana a esta, frecuentemente acoplada en la noche y madrugada a una inversión térmica radiativa (ITR). Nubosidad: Despejado o Nubosidad Parcial Alta. Los parámetros meteorológicos que mejor caracterizan a (VC1 y VC2) son las anomalías positivas de la temperatura y negativas de la humedad relativa en la troposfera media y baja **(MA)** Presencia del Anticiclón Semipermanente del Pacífico, reducida CMM, con la base de la Inversión Térmica de Subsidencia (ITS) situada bajo 150 m s.n.m, Las anomalías positivas de la temperatura y negativas de la humedad relativa en la troposfera media y baja caracterizan a esta configuración. Dorsal en 500 hPa con marcada vorticidad anticiclónica e índice de circulación zonal bajo. **(FA)** Frente en altura. La base de la Inversión Térmica de Subsidencia (ITS) se presenta en SFC asociando marcada estabilidad a niveles bajos, atmósfera mayormente seca en la troposfera baja, cubierto con nubosidad media y alta.[89] (Condición con características BPF, similar a condiciones de empeoramiento prefrontal del factor de ventilación)

[88]Vientos de componente Este en la troposfera media, generando subsidencia forzada en la ladera andina occidental y fortalecimiento de la inversión térmica de subsidencia.
[89] Altocúmulos/Altoestratos/ Cirrus

Factor de Ventilación **Nivel 1- BUENO**	Factor de Ventilación **Nivel 2- REGULAR**	Factor de Ventilación **Nivel 3- MALO**
PMCA BAJO	PMCA MEDIO	PMCA ALTO
Considerando emisiones normales de Anhídrido Sulfuroso, (sin fallas operacionales o aumento anómalo de éstas), se registrarían valores horarios de concentraciones de SO_2<350 µg/m³N	**Considerando emisiones normales de Anhídrido Sulfuroso, (sin fallas operacionales o aumento anómalo de éstas), se registrarían valores horarios: 350 µg/m³N ≤SO_2<500 µg/m³N**	**(PreF)** Aproximación de sistema frontal débil, Inversión Térmica de Subsidencia en SFC, con marcada estabilidad a niveles bajos. Atmósfera seca o no saturada en la troposfera media y baja. Cubierto con nubosidad media y alta.[90] Vientos débiles de componente W/WNW 1,0 a 2,0 m/s. (Condición con características BPF) ***Episodios de Alerta (SO_2≥500 µg/m³N) o mayores respecto al valor horario, se registrarían en Los Maitenes en cualquier mes del año, con mayor frecuencia entre abril y septiembre; en el periodo comprendido entre 09:00 y 18:00 H.L., con un mayor número de casos en torno al mediodía.***

[90] Altocúmulos/Altoestratos/ Cirrus

Factor de Ventilación **Nivel 1- BUENO**	Factor de Ventilación **Nivel 2- REGULAR**	Factor de Ventilación **Nivel 3- MALO**
PMCA BAJO	PMCA MEDIO	PMCA ALTO
QUINTERO **Representativo de la comuna de Quintero** **(SF)** Sistemas frontales activos.[91] **(PosF)** Condiciones Post Frontales marcadamente inestables.[92] **(VC3)** Vaguada Costera en etapa de disipación.[93] (**NF)** Irrupción de Núcleo Frío, (Baja Segregada en altura) a la Zona Central.[94] Cubierto con nubosidad baja del tipo cúmulos y estratocúmulos.	**QUINTERO** **Representativo de la comuna de Quintero** **(PreF)** Condición prefrontal, con transitoria estabilización a niveles bajos, sin formación de inversión térmica radiativa. Nubosidad media y alta compacta. Viento nocturno en superficie de componente EsteNoreste 2,0 a 4,0 m/s. **(MA)** Presencia del Anticiclón Semipermanente del Pacífico. Cubierto con nubosidad baja del tipo estratos y estratocúmulos.	**QUINTERO** **Representativo de la comuna de Quintero** **(VC1 y VC2)** Vaguada Costera en etapas de formación o culminación. La base de la Inversión Térmica de Subsidencia (ITS) se encuentra en superficie o muy cercana a esta, frecuentemente acoplada en la noche y madrugada a una inversión térmica radiativa (ITR). Nubosidad: Despejado o Nubosidad Parcial Alta. Los parámetros meteorológicos que mejor caracterizan a (VC1 y VC2) son las anomalías positivas de la temperatura y negativas de la humedad relativa en la troposfera media y baja. Las mayores concentraciones de SO2 se registran en la noche y hasta las primeras horas de la mañana, cuando la estación de monitoreo se encuentra viento abajo de las principales fuentes que emiten contaminantes, ubicadas al Este/Noreste de la estación. Los episodios se presentan durante todo el año, con una mayor frecuencia e intensidad en el periodo frío (abril-septiembre)

[91]Fuerte gradiente de isohipsas y marcada vorticidad ciclónica en la troposfera media (500 hPa), corriente en chorro intensa en cuanto a la magnitud del viento, alto contenido de humedad, definidos movimientos de ascenso de masas de aire en 700 hPa; (hPa/hora), ausencia de inversión térmica radiativa y de subsidencia, precipitaciones ligeras a moderadas >10 mm/24 horas.

[92]Gradiente térmico vertical (GTV) inestable, presencia de nubosidad cumuliforme normalmente asociada a chubascos, ausencia de inversión térmica radiativa y de subsidencia, Índices de estabilidad con valores favorables para que ocurra desarrollo convectivo en función de las propiedades termodinámicas de la columna de aire: Energía Convectiva Potencial Disponible, CAPE (Joules/kg), Total-Total, K, Showalter, Sweat.

[93]Con Advección de nubosidad baja estratos/estratocúmulos viento ligero de componente Oeste/Noroeste y ascenso de la CMM

[94]Las condiciones de Buena ventilación se mantendrán en la aproximación y presencia del NF. Al pasar hacia el Este se produce típicamente una rápida disminución de la nubosidad y estabilización a niveles bajos; de producirse en el transcurso de la noche puede formarse una inversión térmica radiativa, la que asociada a vientos del Este/Noreste haría que las condiciones de ventilación y dispersión de contaminantes variaran a Malas

Factor de Ventilación **Nivel 1- BUENO**	Factor de Ventilación **Nivel 2- REGULAR**	Factor de Ventilación **Nivel 3- MALO**
PMCA BAJO	PMCA MEDIO	PMCA ALTO
(MA) Presencia del Anticiclón Semipermanente del Pacífico. Cubierto con nubosidad baja compacta del tipo estratos y estratocúmulos. Vientos en superficie de componente SW 1,0 a 3,0 m/s. Gradiente de presión costa-valle[95] mayor a 2,0 hPa en el periodo frío (abril-septiembre) y mayor a 4,0 hPa en el periodo cálido (octubre-marzo). CMM>500 m. s.n.m. ***Considerando emisiones normales de Anhídrido Sulfuroso, (sin fallas operacionales o aumento anómalo de éstas), se registrarían valores horarios de concentraciones de SO_2<350 µg/m³N***	Viento en superficie 0-2 m/s de componente Este. Base de la inversión térmica de subsidencia <300 m s.n.m. Ausencia de inversión térmica radiativa (ITR). **(SF)** Presencia de Sistema Frontal. Nublado a cubierto Ausencia de inversión térmica radiativa (ITR). Ligeramente estable en niveles bajos antes de la entrada del sistema frontal. ***Considerando emisiones normales de Anhídrido Sulfuroso, (sin fallas operacionales o aumento anómalo de éstas), se registrarían valores horarios:350 µg/m³N ≤SO_2<500 µg/m³N***	**(MA)** Presencia del Anticiclón Semipermanente del Pacífico; CMM reducida, con la base de la Inversión Térmica de Subsidencia (ITS) situada bajo 150 m s.n.m. Parcialmente nublado a despejado, asociando en la mayoría de los casos una inversión térmica radiativa (ITR). Las anomalías positivas de la temperatura y negativas de la humedad relativa en la troposfera media y baja caracterizan a esta configuración. Dorsal en 500 hPa con marcada vorticidad anticiclónica e índice de circulación zonal bajo. **(PosF)** Condiciones PostFrontales asociadas a cielos despejados, estabilización a niveles bajos, formación de inversión térmica radiativa y vientos de componente EsteNoreste de 1 a 2 m/s. **(SF)** Sistemas frontales debilitados, nublado a nubosidad parcial, estabilidad a niveles bajos, formación de inversión térmica radiativa en superficie asociada a vientos del EsteNoreste 1 a 3 m/s. **(AF)** Presencia del alta fría, formación de inversión térmica radiativa por enfriamiento nocturno, asociada a cielo mayormente despejado y viento de componente EsteNoreste con una magnitud entre 01 y 03 m/s. Anomalías positivas de la presión en superficie y negativas de la temperatura en 925 hPa caracterizan a esta configuración. **(FA)** Frentes en altura con inversión de subsidencia en superficie, acoplada normalmente con una inversión térmica radiativa, (ITR) Aire seco desde niveles bajos hasta cerca de 500 hPa, Nubosidad variando entre nublado y nubosidad parcial con nubes medias y altas.

[95] Diferencia de presión reducida al nivel medio del mar entre Santo Domingo y Pudahuel a las 14:00 H.L

Factor de Ventilación **Nivel 1- BUENO**	Factor de Ventilación **Nivel 2- REGULAR**	Factor de Ventilación **Nivel 3- MALO**
PMCA BAJO	PMCA MEDIO	PMCA ALTO
		(PreF) Condiciones prefrontales, estabilidad a niveles bajos y formación de inversión térmica radiativa asociada a vientos de componente Noreste 2,0 a 3,0 m/s. Nubosidad media y alta en aumento asociada a la aproximación de un sistema frontal. **(NF)** Núcleo Frío o baja segregada en altura, irrumpiendo en el Norte Chico quedando la zona central en el borde sur del NF.[96]Formación de Inversión Térmica Radiativa (ITR) en la noche hasta primeras horas de la mañana. Vientos en superficie de componente EsteNoreste 1 a 3 m/s. ***Episodios de Alerta (SO_2≥500 µg/m³N) o mayores respecto al valor horario, se registrarían en Quintero mayoritariamente entre abril y septiembre, con un menor número de casos entre octubre y marzo.*** ***Se presentan en la noche hasta primeras horas de la mañana, entre las 22 y 10 H.L. con un mayor número de casos cercanos a la hora de la temperatura mínima. (06:00 a 07:00 H.L.)***

Fuente: Elaboración propia considerando los resultados obtenidos en este Estudio

[96]Vientos de componente Este en la troposfera media, generando subsidencia forzada en la ladera andina occidental y fortalecimiento de la inversión térmica de subsidencia.

7.3 Valores medios para aplicar en futura programación

Desde la Tabla 7-6 hasta la Tabla 7-9 se muestran los valores medios de las variables más relevantes: el promedio, la mediana (percentil 50) y rango intercuartil (percentil 25 y 75), para cada variable por configuración sinóptica, tanto para período frío (Abril-Septiembre) como cálido (Octubre-Marzo).

Estos rangos constituyen los lineamientos específicos para profundizar en metodologías de pronóstico de tipo estadístico o dinámico.

Las variables consideradas son:

H_BASE	Altura de la inversión radiosonda Sto Domingo (metros)
IDT	Diferencia de temperatura base y tope inversión Sto. Dom. (ºC)
DT TORRE	Diferencia de temperatura 10-40 m torre meteo (ºC)
VM TORRE	Viento medio 10-40 m en torre (m/s)
HGT 1000	Altura geopotencial en 1000 hPa Sto Domingo (mgp)
HGT 925	Altura geopotencial en 925 hPa Sto Domingo (mgp)
HGT 850	Altura geopotencial en 850 hPa Sto Domingo (mgp)
HGT 500	Altura geopotencial en 500 hPa Sto Domingo (mgp)
TEM 1000	Temperatura en 1000 hPa Sto Domingo (ºC)
TEM 925	Temperatura en 925 hPa Sto Domingo (ºC)
TEM 850	Temperatura en 850 hPa Sto Domingo (ºC)
TEM 500	Temperatura en 500 hPa Sto Domingo (ºC)
HR 1000	Humedad relativa en 1000 hPa Sto Domingo (%)
HR 925	Humedad relativa en 925 hPa Sto Domingo (%)
HR 850	Humedad relativa en 850 hPa Sto Domingo (%)
HR 500	Humedad relativa en 500 hPa Sto Domingo (%)
ESPESOR	Espesor 1000-500 Sto Domingo (mgp)
MAITENES	Concentraciones diarias de SO2 en Maitenes (ug/m3)
CONCON	Concentraciones diarias de SO2 en Concón (ug/m3)
QUINTERO	Concentraciones diarias de SO2 en Quintero (ug/m3)
TEM SFC	Temperatura en superficie Sto Domingo (ºC)
HR SFC	Humedad relativa en superficie Sto Domingo (%)
PRES SFC	Presión atmosférica en superficie Sto Domingo hPa

Tabla 7-6 Valores medios variables relevantes del Estudio, Período Frío

PROMEDIO	H_BASE	IDT	DT TORRE	VM TORRE	HGT 1000	HGT 925	HGT 850	HGT 500	TEM 1000	TEM 925	TEM 850	TEM 500
MA	226	6,7	1,0	1,8	162	798	1517	5739	9,8	10,7	10,9	-15,4
VC1	77	10,8	2,5	2,0	152	803	1525	5779	10,1	16,3	14,3	-13,8
VC2	94	12,0	1,3	2,0	139	803	1511	5768	8,9	16,1	14,7	-13,9
VC3	395	8,2	-0,3	2,2	146	799	1506	5767	9,7	11,3	14,1	-13,5
preF	400	5,4	0,1	2,3	139	802	1490	5694	10,5	9,5	9,3	-16,4
SF	753	2,8	-0,1	2,8	147	800	1493	5640	11,4	8,6	5,1	-19,3
posF	128	4,2	0,7	2,1	169	809	1511	5634	10,4	8,2	4,3	-21,0
FA	205	5,5	0,7	1,8	160	802	1515	5721	10,2	11,0	10,0	-16,4
NF	103	5,2	0,6	2,0	158	799	1499	5641	9,9	10,0	5,2	-21,5
AF	81	4,9	2,2	2,0	201	798	1536	5645	8,3	7,0	3,5	-21,3
PERC 50	H_BASE	IDT	DT TORRE	VM TORRE	HGT 1000	HGT 925	HGT 850	HGT 500	TEM 1000	TEM 925	TEM 850	TEM 500
MA	75	6,2	1,1	1,8	161	796	1515	5740	10,0	10,8	10,8	-15,3
VC1	75	11,2	2,5	2,0	152	800	1528	5790	10,2	17,1	14,5	-13,5
VC2	75	12,0	1,6	2,0	140	804	1509	5770	8,8	16,4	15,0	-13,1
VC3	269	8,4	-0,7	2,2	145	799	1506	5770	9,6	11,5	14,2	-12,9
preF	84	5,4	-0,5	2,1	139	796	1490	5700	10,4	9,3	9,9	-16,4
SF	75	2,3	-0,5	2,7	151	798	1497	5640	11,4	8,4	5,4	-19,1
posF	75	4,3	0,3	2,1	166	809	1514	5630	10,2	8,6	4,2	-20,5
FA	75	5,4	0,4	1,8	159	801	1512	5730	10,2	11,3	10,6	-15,9
NF	75	5,4	-0,3	1,9	160	800	1498	5625	9,5	9,8	3,7	-22,7
AF	75	5,0	2,2	2,0	202	795	1540	5645	8,4	7,0	3,1	-21,3
PERC 25	H_BASE	IDT	DT TORRE	VM TORRE	HGT 1000	HGT 925	HGT 850	HGT 500	TEM 1000	TEM 925	TEM 850	TEM 500
MA	75	4,2	-0,6	1,3	146	782	1503	5710	8,4	8,2	8,2	-17,9
VC1	75	8,2	1,6	1,6	138	782	1514	5750	8,3	13,5	12,1	-15,9
VC2	75	9,5	-0,1	1,5	123	784	1498	5730	7,0	13,8	12,9	-15,7
VC3	75	5,9	-0,8	1,5	136	786	1495	5733	8,5	7,0	12,2	-16,1
preF	75	2,8	-0,7	1,6	124	783	1474	5660	9,3	6,9	6,2	-18,6
SF	75	1,2	-0,8	1,5	122	785	1477	5600	9,8	6,6	2,6	-21,5
posF	75	2,2	-0,4	1,4	148	792	1495	5598	9,2	6,4	2,1	-23,3
FA	75	3,5	-0,6	1,4	144	784	1501	5700	9,0	8,6	7,3	-18,3
NF	75	3,2	-0,6	1,2	149	789	1495	5560	8,8	6,8	1,8	-24,5
AF	75	3,8	1,6	1,6	181	778	1522	5605	6,9	4,8	1,4	-24,1
PERC 75	H_BASE	IDT	DT TORRE	VM TORRE	HGT 1000	HGT 925	HGT 850	HGT 500	TEM 1000	TEM 925	TEM 850	TEM 500
MA	132	9,0	2,3	2,3	174	813	1530	5780	11,4	13,0	13,6	-12,9
VC1	75	13,4	3,5	2,4	166	819	1535	5815	11,8	19,0	16,4	-11,4
VC2	83	14,5	2,3	2,3	149	820	1520	5800	10,0	18,8	17,1	-11,7
VC3	672	10,9	-0,1	2,8	161	814	1519	5808	11,2	15,0	16,6	-11,1
preF	754	7,8	1,0	2,9	159	817	1506	5730	12,0	12,0	12,3	-14,3
SF	1154	3,2	0,3	3,8	165	814	1508	5680	13,0	10,6	7,2	-16,7
posF	75	6,3	1,9	2,6	185	820	1527	5680	12,1	9,7	6,1	-18,7
FA	83	7,6	1,9	2,3	173	819	1525	5758	11,3	12,9	12,4	-14,3
NF	75	7,2	1,8	2,8	169	812	1504	5710	11,4	13,1	9,4	-16,7
AF	75	5,6	2,7	2,5	218	816	1553	5680	9,2	8,8	5,7	-18,8

Fuente: Elaboración propia considerando los resultados obtenidos en este Estudio y las salidas de diagramas de caja (boxplot)

Tabla 7-7 Valores medios variables relevantes del Estudio, Período Frío (Continuación)

PROMEDIO	HR 1000	HR 925	HR 850	HR 500	ESPESOR	MAITENES	CONCON	QUINTERC	TEM SFC	HR SFC	PRES SFC
MA	84	61	25	26	5577	26,7	26,6	39,0	7,8	93	1011
VC1	70	21	13	24	5627	44,4	54,9	59,9	6,4	89	1009
VC2	87	25	14	21	5629	30,3	36,2	57,3	5,3	97	1008
VC3	93	60	17	26	5621	25,0	18,9	27,1	9,3	95	1009
preF	86	71	40	45	5555	20,2	22,5	30,0	9,9	92	1008
SF	86	88	86	47	5493	12,9	19,7	27,2	11,1	92	1009
posF	82	75	68	30	5465	17,2	20,9	30,9	8,2	95	1011
FA	83	58	32	52	5562	25,2	26,4	40,5	8,5	94	1010
NF	83	77	64	48	5483	14,8	19,6	36,2	7,8	94	1010
AF	77	61	42	21	5444	14,1	31,2	30,7	4,7	96	1016
PERC 50	HR 1000	HR 925	HR 850	HR 500	ESPESOR	MAITENES	CONCON	QUINTERC	TEM SFC	HR SFC	PRES SFC
MA	83	63	17	16	5574	21,3	22,6	25,6	7,6	96	1010
VC1	72	17	8	17	5632	39,3	50,9	55,9	6,4	91	1009
VC2	87	21	11	13	5631	19,1	33,4	45,5	5,0	98	1008
VC3	97	55	10	15	5623	16,9	17,4	15,7	9,8	98	1009
preF	87	78	35	39	5559	13,3	18,8	20,8	10,4	96	1008
SF	88	94	91	51	5500	8,1	14,9	12,8	11,2	95	1009
posF	81	82	74	14	5463	9,1	17,9	13,0	8,8	97	1011
FA	86	60	25	55	5571	21,9	23,3	26,5	8,6	96	1010
NF	84	78	64	54	5457	11,7	14,7	14,4	8,0	95	1011
AF	76	64	42	17	5442	10,3	27,9	15,1	4,4	97	1016
PERC 25	HR 1000	HR 925	HR 850	HR 500	ESPESOR	MAITENES	CONCON	QUINTERC	TEM SFC	HR SFC	PRES SFC
MA	77	42	8	6	5533	12,3	14,1	12,8	5,6	91	1009
VC1	62	12	4	5	5590	24,0	31,8	27,6	4,8	85	1008
VC2	82	14	4	6	5592	9,5	25,0	27,0	3,2	97	1006
VC3	87	36	6	6	5583	6,7	13,4	12,8	8,0	93	1007
preF	78	60	15	15	5516	5,0	11,4	10,4	8,2	89	1006
SF	78	80	82	8	5448	5,3	10,8	7,6	9,6	89	1005
posF	76	64	49	3	5438	5,9	11,4	8,6	6,1	92	1009
FA	76	38	10	15	5526	10,2	15,6	12,8	6,6	91	1008
NF	80	67	54	26	5426	7,1	10,8	10,3	5,8	91	1009
AF	71	51	22	3	5408	6,7	18,8	7,6	3,0	94	1013
PERC 75	HR 1000	HR 925	HR 850	HR 500	ESPESOR	MAITENES	CONCON	QUINTERC	TEM SFC	HR SFC	PRES SFC
MA	92	84	37	37	5617	36,9	34,0	57,3	10,2	98	1012
VC1	78	30	17	35	5673	54,2	68,4	79,6	8,0	97	1011
VC2	95	34	19	27	5671	44,8	44,3	75,9	6,8	99	1009
VC3	100	95	25	32	5668	31,0	23,7	29,4	11,0	99	1011
preF	96	99	57	83	5590	26,2	26,2	38,0	11,8	98	1010
SF	95	99	100	82	5535	14,9	27,9	22,9	12,6	97	1011
posF	86	90	87	68	5497	22,8	26,1	42,9	10,7	98	1013
FA	93	84	49	88	5602	32,0	30,5	54,8	10,6	99	1012
NF	88	93	77	65	5560	20,7	18,2	46,6	9,4	97	1012
AF	85	72	60	30	5477	15,4	41,2	46,6	6,4	99	1017

Fuente: Elaboración propia considerando los resultados obtenidos en este Estudio y las salidas de diagramas de caja (boxplot)

Tabla 7-8 Valores medios variables relevantes del Estudio, Período Cálido

PROMEDIO	H_BASE	IDT	DT TORRE	VM TORRE	HGT 1000	HGT 925	HGT 850	HGT 500	TEM 1000	TEM 925	TEM 850	TEM 500
MA	451	6,3	-0,3	1,8	138	797	1509	5789	13,0	10,7	14,6	-12,1
VC1	115	7,5	0,4	1,6	123	801	1510	5814	13,4	16,3	17,2	-10,7
VC2	175	8,7	-0,1	2,1	109	807	1499	5826	12,8	16,1	18,7	-9,8
VC3	488	8,7	-0,5	2,5	122	800	1499	5806	12,5	11,3	16,9	-10,7
preF	593	5,7	-0,3	1,7	136	798	1493	5719	11,7	9,5	10,2	-14,7
SF	727	2,8	-0,6	2,4	141	802	1492	5660	12,3	8,6	6,6	-18,2
posF	794	2,0	-0,6	1,4	164	816	1506	5638	11,7	8,2	3,8	-20,5
FA	373	3,7	0,0	1,4	143	798	1507	5749	12,6	11,0	11,6	-14,8
NF	606	3,8	-0,3	1,9	136	800	1497	5720	13,3	10,0	10,7	-16,5
AF	380	2,5	1,0	1,7	188	801	1527	5650	9,4	7,0	4,1	-21,8
PERC 50	H_BASE	IDT	DT TORRE	VM TORRE	HGT 1000	HGT 925	HGT 850	HGT 500	TEM 1000	TEM 925	TEM 850	TEM 500
MA	425	6,6	-0,8	1,7	135	794	1509	5800	13,0	14,7	15,0	-11,7
VC1	75	7,4	0,3	1,6	124	800	1510	5810	13,4	19,0	17,2	-10,7
VC2	148	8,6	-0,8	1,8	105	802	1497	5820	13,0	19,4	18,4	-10,1
VC3	473	9,0	-0,9	2,5	122	799	1500	5810	12,4	16,3	16,8	-9,9
preF	313	5,9	-0,8	1,8	137	794	1490	5715	11,7	11,1	10,4	-15,0
SF	616	2,8	-0,9	1,9	137	799	1492	5660	12,3	9,8	6,6	-18,1
posF	405	2,2	-0,8	1,2	164	820	1505	5640	12,0	8,3	4,2	-20,7
FA	194	4,0	-0,1	1,4	144	794	1508	5740	12,4	13,8	11,4	-14,9
NF	553	4,1	-0,6	1,8	138	800	1495	5730	13,8	10,0	11,2	-16,1
AF	108	2,5	1,1	1,8	196	799	1529	5640	8,3	8,3	3,4	-22,8
PERC 25	H_BASE	IDT	DT TORRE	VM TORRE	HGT 1000	HGT 925	HGT 850	HGT 500	TEM 1000	TEM 925	TEM 850	TEM 500
MA	136	4,2	-0,9	1,1	124	783	1500	5760	11,6	12,0	12,4	-14,3
VC1	75	5,4	-0,7	1,0	112	782	1502	5790	12,0	16,8	15,5	-12,5
VC2	75	7,9	-1,0	1,1	96	791	1488	5790	12,0	17,6	16,6	-11,9
VC3	264	7,5	-1,0	1,7	107	790	1489	5770	11,7	13,3	15,3	-12,6
preF	75	5,2	-1,0	1,2	130	784	1484	5690	10,8	6,8	8,2	-15,9
SF	204	2,4	-1,0	1,6	129	792	1484	5640	11,4	8,6	5,0	-20,7
posF	75	1,1	-0,9	0,7	153	789	1494	5600	9,8	5,8	1,6	-23,7
FA	75	1,5	-0,9	0,9	132	781	1498	5718	10,8	10,9	9,4	-17,8
NF	219	2,3	-0,8	1,2	120	785	1484	5700	13,0	6,8	9,0	-18,1
AF	75	2,0	-0,2	1,5	174	795	1520	5590	7,3	5,5	1,5	-25,1
PERC 75	H_BASE	IDT	DT TORRE	VM TORRE	HGT 1000	HGT 925	HGT 850	HGT 500	TEM 1000	TEM 925	TEM 850	TEM 500
MA	699	8,2	0,2	2,3	149	809	1518	5820	14,4	17,6	17,4	-9,5
VC1	136	9,3	1,2	1,9	134	816	1520	5840	14,8	20,8	18,9	-8,9
VC2	241	10,4	0,3	2,3	126	823	1508	5860	14,2	21,1	21,1	-8,0
VC3	701	10,4	-0,4	3,2	133	814	1508	5848	13,7	20,2	19,3	-8,4
preF	1127	6,6	0,5	2,1	143	818	1505	5750	12,4	13,2	12,0	-13,7
SF	1269	3,4	-0,5	2,7	161	815	1504	5700	13,6	10,0	9,2	-15,1
posF	1262	2,5	-0,5	1,9	176	838	1514	5665	13,2	10,9	5,7	-18,7
FA	571	4,9	0,5	1,9	149	810	1514	5780	14,1	15,2	13,6	-12,5
NF	839	5,6	0,2	2,5	151	809	1509	5750	14,4	13,1	13,0	-13,9
AF	406	2,6	2,2	2,0	197	807	1531	5700	11,6	10,3	5,7	-18,4

Fuente: Elaboración propia considerando los resultados obtenidos en este Estudio y las salidas de diagramas de caja (boxplot)

Tabla 7-9 Valores medios variables relevantes del Estudio, Período Cálido (Continuación)

PROMEDIO	HR 1000	HR 925	HR 850	HR 500	ESPESOR	MAITENES	CONCON	QUINTERC	TEM SFC	HR SFC	PRES SFC
MA	87	63	34	22	5652	30,7	13,9	15,6	13,4	87	1007
VC1	75	33	13	19	5691	36,7	22,9	18,5	12,6	82	1006
VC2	86	36	14	21	5717	28,1	17,3	15,5	12,9	87	1004
VC3	91	53	23	19	5685	23,8	12,9	12,6	13,1	91	1006
preF	88	73	42	40	5583	21,2	14,6	22,5	12,0	91	1007
SF	87	82	73	42	5519	22,0	14,3	20,3	13,1	87	1008
posF	83	74	76	21	5474	11,9	8,3	13,9	12,0	91	1011
FA	87	63	48	47	5606	24,7	14,8	16,8	12,7	90	1008
NF	83	77	63	33	5584	23,2	11,7	19,9	13,9	84	1007
AF	73	56	43	15	5462	9,6	17,7	17,2	9,3	81	1014
PERC 50	HR 1000	HR 925	HR 850	HR 500	ESPESOR	MAITENES	CONCON	QUINTERC	TEM SFC	HR SFC	PRES SFC
MA	88	59	29	14	5659	25,4	12,2	9,7	13,8	88	1007
VC1	79	33	10	12	5693	29,4	20,3	15,5	12,8	83	1006
VC2	87	36	10	12	5719	29,3	16,6	12,1	12,8	87	1004
VC3	92	46	17	12	5695	17,3	11,8	9,1	13,1	90	1005
preF	90	77	38	21	5585	18,9	14,0	10,9	11,9	92	1007
SF	91	83	84	33	5519	14,0	8,1	7,7	12,9	88	1008
posF	84	75	80	13	5478	9,5	6,9	9,4	12,4	93	1011
FA	89	72	45	42	5609	18,8	14,3	11,8	12,4	92	1008
NF	84	78	60	18	5595	19,3	10,3	9,8	14,4	83	1007
AF	76	54	45	16	5437	7,7	16,5	9,8	9,1	84	1015
PERC 25	HR 1000	HR 925	HR 850	HR 500	ESPESOR	MAITENES	CONCON	QUINTERC	TEM SFC	HR SFC	PRES SFC
MA	82	45	15	6	5616	25,4	12,2	6,9	12,1	83	1006
VC1	66	22	4	7	5660	29,4	20,3	8,6	10,3	72	1004
VC2	78	30	7	6	5668	29,3	16,6	7,3	11,5	80	1003
VC3	87	34	11	4	5637	17,3	11,8	6,6	11,8	86	1004
preF	81	55	25	7	5547	18,9	14,0	7,2	10,0	86	1007
SF	78	73	53	15	5483	14,0	8,1	6,7	12,0	80	1006
posF	77	67	73	7	5423	9,5	6,9	6,4	9,5	85	1009
FA	83	43	35	9	5559	18,8	14,3	8,2	11,0	86	1006
NF	80	67	39	8	5561	19,3	10,3	7,7	13,8	78	1005
AF	63	45	14	8	5394	7,7	16,5	8,6	5,8	70	1012
PERC 75	HR 1000	HR 925	HR 850	HR 500	ESPESOR	MAITENES	CONCON	QUINTERC	TEM SFC	HR SFC	PRES SFC
MA	94	82	51	32	5695	41,1	16,9	16,9	15,2	95	1009
VC1	85	40	19	28	5723	49,4	26,5	24,6	15,0	94	1007
VC2	96	41	17	34	5759	37,9	21,3	16,3	15,0	97	1006
VC3	97	67	36	26	5730	33,8	16,4	16,6	14,3	96	1007
preF	97	90	50	77	5616	31,8	18,0	35,7	13,6	97	1008
SF	95	92	88	72	5568	25,7	17,4	9,9	14,6	95	1010
posF	91	85	88	19	5516	17,6	11,5	16,4	13,8	98	1012
FA	95	85	66	80	5652	31,3	18,2	25,6	13,9	96	1009
NF	88	93	84	60	5638	28,8	14,2	23,7	15,4	89	1009
AF	83	76	67	20	5527	11,7	22,5	18,8	12,5	96	1015

Fuente: Elaboración propia considerando los resultados obtenidos en este Estudio y las salidas de diagramas de caja (boxplot)

7.4 Análisis de Episodios

Se seleccionaron 10 episodios de SO_2, un ejemplo para cada configuración sinóptica evaluada.

La Tabla 7-10 muestra episodios de SO_2 horario ≥500 µg/m³N en las estaciones de monitoreo de Concón, Quintero y Los Maitenes, representativas de las 3 comunas de la zona del estudio.

Se eligieron estos episodios sobre la base de que el registro de SO_2 esté sobre el percentil 80 de los registros máximos horarios del periodo 2016-2019 para cada estación de monitoreo, y que para el día seleccionado se cuente con información del radiosondeo de Santo Domingo y de la Torre Meteorológica.

Tabla 7-10 Análisis Episodios SO_2 horario ≥500 µg/m³N

Episodios SO2		Radiosonda SCSN 12 UTC						Viento SFC		Torre Met				
Fecha/Hora	Estación	SO2 µg/m³N	CS/MS	ACM m s.n.m	EsITR mts.	Ad	TopITS m s.n.n.	Wd (°)	Ws m/s	Prom °C	Max °C	H>0 N°	Hmax	DESV
2017-04-26 02:00	Concón	1019	MA	336			728	127	2,0	2,1	3,3	9	8:00	1,1
2018-06-04 01:00	Concón	691	FA	SFC		cBPF	659	122	3,4	2,9	6,4	10	6:00	2,0
2018-07-20 04:00	Quintero	1099	AF	SFC	298		S/I	64	0,4	2,2	4,3	9	4:00	1,0
2016-05-30 03:00	Quintero	716	PosF	SFC	218		S/I	66	2,6	1,4	2,7	9	9:00	0,7
2017-08-03 03:00	Quintero	922	VC2	SFC	176	ACS	854	111	0,4	1,5	3,5	13	5:00	0,6
2017-05-14 04:00	Quintero	513	SF	SFC	176		S/I	79	3,4	0,8	1,8	8	3:00	0,6
2016-09-06 12:00	Los Maitenes	922	VC1	SFC		ACS	302	280	1,7	1,9	3,6	11	7:00	0,8
2016-07-23 15:00	Los Maitenes	541	PreF	84		cBPF	292	279	1,2	0,7	1,2	3	8:00	-0,8
2016-12-08 17:00	Los Maitenes	610	NF	705			915	256	1,8	Sin inversión				
2017-01-06 15:00	Los Maitenes	529	VC3	402			938	270	2,3	0,4	1,1	5	3:00	-0,1

Fuente: Elaboración propia con resultados del estudio

Donde,

SO_2	Máximo valor horario SO_2
CS/MS	Condición Sinóptica o de Mesoescala
ACM	Altura de la capa de mezcla
EsITR	Espesor Inversión Térmica Radiativa (ITR)
Ad	Características adicionales de las Configuraciones
ACS	Inversión Térmica de Subsidencia (ITS) acoplada con Inversión Térmica Radiativa (ITR)
cBPF	PreF o FA con características de condición BPF
TopITS	Altura del tope de la Inversión Térmica de Subsidencia

WD	Dirección del viento en superficie
WS	Magnitud del viento en superficie
Prom	Promedio dT>0
Max	Valor máximo horario dT>0
H>0	Número de horas con dT>0
Hmax	Hora en que se registró el máximo dT> 0
DESV	Desviación Estándar normalizada del promedio diario respecto al valor mensual

Se constata en la Tabla 7-10 que las inversiones térmicas radiativas en Santo Domingo tienen un adecuado correlato en las inversiones registradas entre 40 y 10 m la Torre Meteorológica.

Se observa que los episodios registrados en Quintero corresponden al periodo frío (abril-septiembre). En los cuatro casos registrados están presentes inversiones térmicas radiativas, y en uno de estos, la inversión radiativa se encuentra acoplada (en interacción) con la inversión térmica de subsidencia (el 03-08-2017). El espesor medio de las ITRs es del orden de 200 m s.n.s., la dirección del viento del Este y Este-Noreste con una magnitud entre 2 y 3 m/s registradas en horas de la madrugada.

Las superaciones del actual nivel de Alerta en Concón también corresponden al periodo frío con un viento en superficie del Este-Sureste entre 2 y 3 m/s. El episodio asociado a un frente en altura (FA) presentó características asociadas al Tipo BPF, y los episodios se registraron en la madrugada.

En Los Maitenes las concentraciones de SO_2 horario ≥500 µg/m³N, se registraron tanto en el periodo frío como en el cálido (octubre-marzo). La dirección predominante del viento fue del Oeste entre 1 y 2 m/s.

En Anexo "Análisis de episodios y superaciones de Norma de SO_2" se incluyen Tablas con la información de las superaciones de Norma SO_2 ≥350 µg/m³N y de los episodios SO_2 ≥500 µg/m³N registrados en el periodo 2016-2019.

8 Producto vii. Evaluación de las metodologías de pronóstico de calidad del aire revisadas.

El objetivo de este producto es evaluar distintas metodologías de pronóstico para calidad del aire (gases y partículas) y su potencial uso en la zona de interés.

8.1 Sistemas de pronóstico de calidad del aire

Se realizó un levantamiento de información de los sistemas de pronóstico implementados y utilizados a nivel mundial, destacándose el caso de Brasil, por ser el país Latinoamericano que ha implementado importantes mejoras a un modelo de uso propio. Estados Unidos debido a los grandes avances que ha logrado con relación al desarrollo de herramientas de pronóstico y España debido a las capacidades desarrolladas de evaluación continua desde el 2009.

La Tabla 8-1 presenta el resumen de los modelos de pronóstico revisados, el presupuesto requerido y su nivel de acierto.

Tabla 8-1 Sistemas de pronóstico implementados

Localidad, país	**Tipo de herramienta**	**Herramienta**	**Presupuesto (miles de dólares)**	**Año implementación**	**Acierto**
Sao Paulo, Brasil	Modelo determinístico	BRAMS-CATT	USD 3000 Presupuesto destinado para todas las actividades de INPE	2002-2003 Utilizado actualmente	R^2=0,7 (Subestima)
ZMCM, México	Modelo determinístico, ajustes estadísticos, análisis fenomenológico	MM5-CIT	USD 400 Presupuesto destinado a la operación de la red de monitoreo y pronóstico	2002	No evaluado
	Modelo determinístico, ajustes estadísticos.	WRF-CMAQ	Sin información	Actualmente Operado por BSC	Sin información
Distintas localidades USA	Modelo determinístico, ajustes estadísticos, análisis fenomenológico	MM5- MAQSP RT-SMOKE-BEIS3-CMAQ		2002	Evaluado de acuerdo a la aplicación y Reglamentación vigente de cada localidad
	Modelo determinístico, ajustes estadísticos, análisis fenomenológico	RUC ModelRapid Update Cycle)NAM Model (North American Mesoscale) Eta NGM Model(Nested	Presupuesto para todas las actividades NOAA: 5.8 billones de dólares EPA: 8.8 billones	2019 FV3GFS	Evaluado en cada estado

Localidad, país	Tipo de herramienta	Herramienta	Presupuesto (miles de dólares)	Año implementación	Acierto
		Grid Model) GFS WRF ECMWF UKMET FV3GFS MAQSP RT-SMOKE-BEIS3-CMAQ	de dólares		
Hong Kong, Beijing, China	Modelo determinístico, sistemas acoplados.	MM5-CAMx-CMAQ-Polyphemus-NAQPMS Actualmente WRF-Chem	No estimado / Falta información	2008 Actualmente WRF-Chem	No evaluado
Cataluña, España	Modelo determinístico	CALIOPE HERMESv3 WRF-CMAQ BSCDREAM8		2009	SO2 sesgo ± 3 µg/m³ r ≤ 0.10 RMSE< 5 µg/m³
Temuco, Chile	Modelo estadístico, análisis fenomenológico, Modelo determinístico	CENMA Regresión Lineal Múltiple	USD 40	2006	85%
		MMA -DMC PMCA WRF-CHEM	Sin información	2014	Sin información
Rancagua, Chile	Modelo estadístico, análisis fenomenológico	CENMA Regresión Lineal Múltiple	USD 30	2010	Sin información
	Modelo determinístico, análisis fenomenológico	MMA-DMC PMCA WRF-CHEM	Sin información	2013	Sin información
Santiago, Chile	Modelo estadístico, análisis fenomenológico	CASSMASSI Regresión Lineal Múltiple, CENMA MOS, CENMA, Neuronal	USD 140	2000	80%
	Modelo determinístico, anális.fenomenológico	MMA-DMC PMCA WRF-CHEM	Sin información	2012	Sin información
Coyhaique, Chile	Modelo estadístico	MOS MMA-DMC WRF-CHEM	Sin información	2017	Sin información

Fuente: Sobre la base del Estudio Prefactibilidad Actualización del Sistema de Pronóstico[97]

NOTA: Actualmente, el MM5 ha sido reemplazado por WRF.

[97]Estudio "Prefactibilidad de la actualización del sistema de pronóstico de calidad del aire para MP en la Región Metropolitana", CENMA 2010

8.1.1 Sistemas de pronóstico en Chile

Los sistemas de pronóstico revisados a nivel nacional han sido implementados para dar respuesta a las exigencias asociadas a los planes de descontaminación de cada una de las zonas afectadas, y son utilizados en mayor medida en los períodos en que se generan episodios críticos de contaminación atmosférica. Son operados por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y administrados por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), dentro del marco de convenio de cooperación entre la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) y el MMA.

El modelo determinístico utilizado es el modelo numérico meteorológico Weather Research and Forecasting acoplado con el modelo de química atmosférica CHEM (WRF-Chem-CO tracer). Permite pronosticar los niveles de calidad del aire para MP10, MP2,5 y la meteorología de superficie y altura (temperatura, dirección y magnitud viento, humedad relativa, precipitaciones, entre otros), con un horizonte de pronóstico de 72 horas.

8.1.1.1 Sistema de pronóstico Calidad del aire de Temuco

El Sistema pronóstico de Calidad del aire de Temuco[98] se realiza para MP10 y MP2,5, y desde el año 2014 ha sido operado por la DMC. Se basa en un pronóstico de tipo estadístico (estocástico), consistente en ecuaciones de regresión lineal múltiple que integran variables meteorológicas de superficie y altura, la calidad de aire registrada y un Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA). Dicho sistema, fue desarrollado y validado durante los años 2006 a 2013 por el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA). Además, se utiliza el sistema WRF-CHEM.

8.1.1.2 Sistema de pronóstico Calidad del aire Región Metropolitana (RM)

El sistema de pronóstico de la RM[99] se basa en el pronóstico del PMCA para MP10, operado desde el año 2012 por la DMC, también el sistema WRF-CHEM. Además, cuenta con monitoreo en altura que administra el Departamento de Redes de monitoreo del MMA en conjunto con la DMC, desplegando en tiempo real la información proporcionada por un nefobasímetro, el cual está instalado en dependencias de la DMC en Quinta Normal, en colaboración con el Departamento de Geofísica (DGF) de la Universidad de Chile.

8.1.1.3 Sistema de pronóstico Calidad del aire de Rancagua

El Sistema pronóstico de Calidad del aire de Rancagua[100]se basa en el pronóstico del PMCA para MP10, y desde el año 2013 es operado por la DMC. Se utiliza también el sistema WRF-CHEM.

---

[98]"Plan operacional para la GEC en el marco del Plan de Descontaminación atmosférica de Temuco y Padre Las Casas, SEREMI MA, 2019"

[99] Plan operacional GEC, Seremi del Medioambiente, Región Metropolitana de Santiago, Año 2019

[100] Informe Final Plan operacional para la GEC por material Particulado Respirable (MP10) en la Zona saturada del Valle Central de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Seremi del Medioambiente, Región del Libertador general Bernardo O'Higgins, año 2018

8.1.1.4 Sistema de pronóstico Calidad del aire de Coyhaique

El Sistema pronóstico de Calidad del aire de Coyhaique[101]se basa en pronóstico de calidad del aire para material particulado MP10 y desde 2014 es operado por la DMC. También se corre WRF-CHEM. El sistema principal consiste en un Pronóstico Meteorológico Estadístico que entrega información para prever al menos con 24 horas de anticipación la evolución de las concentraciones de contaminantes y la posible ocurrencia de episodios críticos. Se basa en una técnica de modelación estadística denominada Model Output Statistics (MOS) aplicada a las series de concentración de MP10 para cada una de las estaciones. El MOS busca relaciones empíricas entre un conjunto de predictores y la variable que se desea pronosticar o predictando, que en este caso es el material particulado MP10. Se basa en la técnica de regresión lineal múltiple, que integran variables meteorológicas de superficie, altura y la calidad de aire pronosticada y registrada[102].

8.1.1.5 Sistemas de pronóstico asociados a la Minería

Principalmente asociados al cumplimiento de compromisos ambientales adquiridos en sus Resoluciones de Calificación ambiental RCA, diversos proyectos relacionados en su mayoría a minería, efectúan pronósticos meteorológicos y de calidad del aire. El objetivo es gestionar sus procesos productivos y de emisión de contaminantes, de modo de no superar las normativas de calidad del aire, especialmente las de material particulado y SO_2.

Estos pronósticos operacionales estiman los aportes y/o contribuciones de las distintas fuentes de emisiones asociadas a los procesos de extracción de minerales, en las concentraciones registradas por las estaciones de monitoreo, en su mayoría con representatividad poblacional, y que se encuentran dentro del área de influencia de los proyectos.

Casi en su totalidad, estos pronósticos operacionales se realizan utilizando el modelo meteorológico WRF, acoplado a modelos de dispersión y transporte de contaminantes como CHEM o CALPUFF. La resolución espacial entre 3 y 1 km, temporal de 1 hora, con horizontes de pronóstico a 48 y 72 horas y dominio relativamente pequeños que típicamente no exceden los 30 km^2, acorde a las áreas de influencia definidas para cada proyecto.

La principal ventaja de estos pronósticos operacionales es la periodicidad de actualización de sus emisiones, y su resolución temporal. Las tasas de emisión pueden definirse con variaciones incluso a niveles horarios, las que suelen tener actualizaciones semanales o quincenales. Esto debido a que los escenarios de operación se estiman en base a las planificaciones de corto plazo, lo que permite introducir dentro de la sensibilidad del modelo las emisiones dinámicas, asociadas a los procesos productivos cambiantes semanalmente.

---

[101] Resolución exenta 532 Aprueba metodología de pronóstico de calidad del aire para material particulado respirable MP10, para la aplicación del plan de descontaminación atmosférica para la ciudad de Coyhaique y su zona circundante, Santiago 2017.

[102] https://mma.gob.cl/seremi-del-medio-ambiente-valora-disminucion-de-episodios-criticos-en-la-ciudad-de-coyhaique/

8.1.2 Sistemas de pronóstico a nivel internacional

8.1.2.1 Sistema de pronóstico Sao Paulo, Brasil

El sistema de pronóstico en Brasil es operado por el Centro de Previsión Meteorológica y Estudios Climáticos (CPTEC)[103], dependiente del Instituto Nacional de Estudios Espaciales (INPE)[104].

El sistema de pronóstico consiste en el acoplamiento de un modelo meteorológico a escala regional llamado Sistema de Modelamiento Regional Atmosférico Brasileño (BRAMS)[105], el que está basado en el Sistema de Modelamiento Regional Atmosférico (RAMS), desarrollado originalmente en CSU/USA, CCATT-BRAMS.

BRAMS se ha utilizado para el pronóstico operacional de calidad del aire desde el año 2003, en un dominio que abarca toda América del Sur con una resolución espacial de 25 km[106]. A partir de 2013, BRAMS 5 se ha estado ejecutando operativamente en la supercomputadora Tupã del Centro. Utiliza 9600 núcleos para procesar los pronósticos meteorológicos regionales, en una cuadrícula de resolución de 5 km que cubre toda América del Sur.

Algunas características del modelo operacional se presentan en la Tabla 8-2.

Tabla 8-2 Características pronóstico operacional CPTEC

Pronóstico CPTEC	Características
Dominio	1360 x 1489 x 55 ~ 10^8 puntos de grilla
Resolución temporal (Time-step)	15 segundos
Resolución espacial	Horizontal: 5km x 5km Vertical: 50-800 m
Horizonte del pronóstico	84 horas, y se emite dos veces al día
Horario Salidas	00 - 12 UTC

Fuente: http://brams.cptec.inpe.br/about/

Este sistema de pronóstico se presenta para destacar que es el único modelo a nivel de Latinoamericano que se ha desarrollado e implementado específicamente para un país (Brasil). No se cuenta con información de su desempeño para pronóstico de contaminantes en la zona de estudio como el SO_2. Una descripción más completa del modelo se presenta en Anexos_ Sistemas de pronóstico.

8.1.2.2 Sistema de pronóstico Cataluña, España

El Sistema de pronóstico de calidad del aire CALIOPE ofrece de forma operacional, el pronóstico horario de la calidad del aire a 24h y 48h. Para Europa (12x12 km) y la Península Ibérica (4x4 km), con anidamientos a alta resolución espacial en Islas Canarias (2x2 km) y Cataluña (1x1 km).

El Pronóstico consta de tres bloques principales:

[103] https://www.cptec.inpe.br/sp/sao-paulo
[104] http://www.inpe.br/
[105] http://www.cptec.inpe.br/brams
[106] Las predicciones de gases y aerosoles están disponibles en tiempo real en www.medioambiente.cptec.inpe.br

- Pronóstico meteorológico: temperatura, precipitación, humedad, presión, nubosidad, dirección y magnitud del viento, entre otras.
- Pronóstico de emisiones: óxidos de nitrógeno (NO2 y NO), compuestos orgánicos volátiles (COVs), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2) y material particulado (PST).
- Pronóstico de calidad del aire: O_3, NO_2, CO, SO_2, MP10, MP2.5 y Benceno.

El Sistema CALIOPE está integrado por los siguientes modelos:

- Modelo de inventario de emisiones (HERMESv3)
- Modelo meteorológico (WRF-ARW)
- Modelo de transporte fotoquímico (CMAQ)
- Modelo de transporte de polvo sahariano (BSC-DREAM8bv2)

Principales productos del pronóstico:

- Mapas horarios por dominio
- Pronóstico de emisiones
- Pronóstico meteorológico
- Pronóstico de la calidad del aire para estaciones que miden calidad del aire (EIONET)
- Niveles de la calidad del aire
- Evaluación del pronóstico en tiempo casi real
- Tablas de valores máximos de la calidad del aire, previstos para 24 y 48h
- Fichas resumen de la evolución anual del pronóstico (estadísticos y gráficos)
- Imágenes de satélite
- Calidad del aire
- Meteorología

El Sistema CALIOPE representa el estado actual del conocimiento en temas de modelización de pronóstico de la calidad del aire a nivel mundial. El sistema desde el 2009 se evalúa de forma continua (NRT: Near Real Time) con observaciones horarias.

8.1.2.3 Sistema de pronóstico Zona metropolitana del valle de México (ZMVM) y Ciudad de México (CDMX), México

El sistema de pronóstico de la calidad del aire de la Ciudad de México fue desarrollado por la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México en colaboración con el Centro de Super cómputo de Barcelona (CSB), mismo operador de CALIOPE. Entrega un pronóstico operacional para estimar el estado de la calidad del aire para las siguientes 24 horas, utilizando el conocimiento actual sobre la química y dinámica atmosféricas de la región.

Tabla 8-3 Características pronóstico operacional CDMX

Pronóstico CDMX	**Característica**
Dominio	Ciudad de México y su área metropolitana
Resolución temporal (Time-step)	1 hora
Resolución espacial	1 km
Horizonte del pronóstico	24 horas
Horario Salidas	00 - 12 UTC

Fuente: http://www.aire.cdmx.gob.mx/pronostico-aire/sobre-modelo.php

El modelo meteorológico utilizado es WRF y el de transporte de contaminantes CMAQ. El inventario de emisiones entrega información de óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, monóxido de carbono, dióxido de azufre, amoníaco y partículas suspendidas.

Una descripción más completa del modelo se presenta en Anexos_ Sistemas de pronóstico.

8.1.2.4 Sistema de pronóstico Estados Unidos

El Sistema de pronóstico en Estados unidos es realizado principalmente por dos instituciones, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) y la agencia de protección ambiental de estados unidos (EPA).

El Servicio Nacional de Meteorología (NWS) tiene como misión proporcionar los pronósticos meteorológicos, hídricos y climáticos y las alertas respectivas para la protección de la vida y la propiedad. Mediante el Centro de Modelamiento Ambiental (EMC) entrega las directrices para las metodologías y modelos de pronóstico a aplicados en el territorio de Estados Unidos. Es por esto por lo que existen varios modelos implementados, los que son operados por distintos centros como se presenta en la Tabla 8-4.

Tabla 8-4 modelos de pronóstico implementados en Estados Unidos

Modelo	**Operación**
RUC Model (Rapid Update Cycle)	National Center for Atmospheric Research
	Forecast Systems Laboratory (FSL)
	NCEP
	College of DuPage
	University of Wyoming
NAM Model (North American Mesoscale) Eta	National Center for Atmospheric Research
	Institute of Global Environment and Society
	NCEP
	Ohio State University
	College of DuPage
	University of Wyoming
NGM Model (Nested Grid Model)	NCEP
	University of Wisconsin
	College of DuPage
	University of Wyoming
GFS (Global Forecast System)	NCEP
	Short Range Forecasts for North America [Institute of Global Environment and Society]

	Medium Range Forecasts for North America [Institute of Global Environment and Society]
	University of Wisconsin
	Ohio State University
	College of DuPage
	University of Wyoming
WRF (Weather Research and Forecast)	The NASA Short-term Prediction Research and Transition (SPoRT) Center
	Ohio State University
ECMWF	College of DuPage
UKMET	College of DuPage
	University of Wyoming

Fuente: NWS NOAA

Actualmente se ha invertido en un esfuerzo a nivel país para desarrollar un sistema unificado de pronóstico (UFS), el cual se basa en un sistema integrado por una comunidad de modelación, que busca desarrollar y mejorar un sistema acoplado-integrado de modelación para el sistema terrestre. Estos desarrollos comenzaron en 2014 como parte del plan de operación de NWS para actualizar y mejorar el sistema de pronóstico global GFS. Después de un largo proceso de evaluación de distintas alternativas, se optó por "Finite-Volume on a Cubed-Sphere" (FV3) como el núcleo dinámico de modelación a partir de 2016. El sistema FV3-GFS fue implementado finalmente en junio de 2019 en el EMC.

Para el despliegue de los mapas con las mediciones registradas por las redes de monitoreo y los pronósticos de calidad del aire para Estados Unidos se utiliza la plataforma Air Now[107]. La Figura 8-1 presenta el pronóstico de calidad del aire para O_3, MP10 y MP2,5.

Una descripción más completa del modelo se presenta en Anexos_ Sistemas de pronóstico.

[107]https://www.airnow.gov/

Figura 8-1 Plataforma de pronóstico de calidad del aire AirNow, la escala de colores utilizada se basa en los riesgos para la salud.

Fuente: https://www.airnow.gov/

8.2 Sistemas de pronóstico deeplearning

Los procesamientos estadísticos, como la regresión lineal múltiple o los autorregresivos integrados de promedio móvil ARIMA, son frecuentemente utilizados. Sin embargo, estos modelos no son capaces de reconocer patrones de correlación no lineales, por lo que no son un buen método para pronosticar concentraciones extremas, como los máximos. Las alternativas más actualizadas en cuanto a estas técnicas son las redes neuronales artificiales ANNs y la regresión con soporte vectorial SVR. La utilización de ambas técnicas en conjunto ha generado modelos híbridos con un mejor acierto en sus pronósticos (Sanchez et al. 2013). Sin embargo, estas metodologías generaban pronósticos para las estaciones de monitoreo por separado, sin incluir la alta correlación espacial que existe en entre las estaciones, en especial para las variables asociadas a calidad del aire.

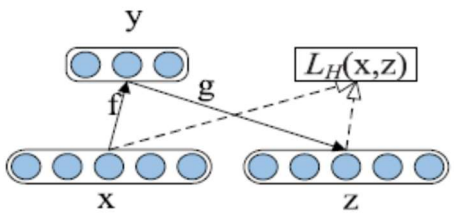
Los modelos de pronóstico espacio temporal que incluyen la calidad del aire han mejorado en la actualidad, ya sea mediante el uso de técnicas basadas en redes neuronales “spatio temporal artificial neural network” STANN, o mediante regresión con soporte vectorial “spatio temporal support vector regression” STSVR.

Las nuevas tecnologías asociadas a aprendizaje automático “machine learning” y recientemente aprendizaje profundo “deeplearning”, se han implementado con éxito en aplicaciones de procesamiento y reconocimiento de patrones de imágenes y lenguaje. Los algoritmos utilizados en Deeplearning usan una arquitectura multicapa que permite identificar la estructura representativa de los datos. Al utilizarse en una base de datos modelada que incluya las variables meteorológicas, emisiones y los datos observados en las estaciones de monitoreo, puede contribuir a una mejora del acierto del pronóstico.

Una de las metodologías más utilizadas en deeplearning (Li et al, 2016) es un autocodificador apilado “Stackerautoencoder”, el que extrae las características principales de una base datos de calidad de aire con dimensión espacial y temporal.

Un autoencoder se basa en una red neuronal para reconstruir sus entradas “inputs”, utilizando métodos como el principio de análisis por componentes PCA. La Figura 8-2 presenta la arquitectura de un autoencoder, al que se entrega un set de datos de entrenamiento X, del cual el autoencoder genera el vector de Y mediante la función f. Esta se decodifica nuevamente mediante la función g para generar el vector de salida Z. El set de parámetros de la codificación se basa en la función sigmoidea y se optimizan para minimizar la función L (X, Z) que es el sesgo “Bias”.

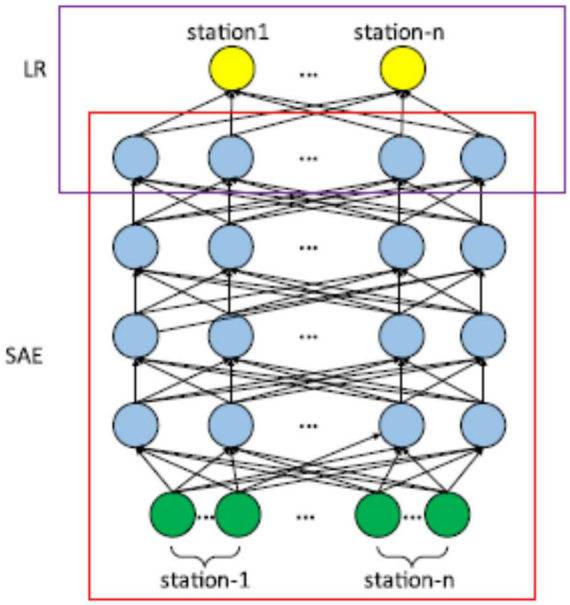
Figura 8-2 Arquitectura autoencoder



Fuente: Deep learning architecture for air quality predictions, 2016

Un “stackedautoencoder” SAE es una concatenación de autoencoders, específicamente para un SAE con L capas. La primera capa se entrena utilizando un set de entrenamiento como input, luego de obtener la primera capa “hidden” o subcapa, la salida de la k-esima subcapa (para k<L) es utilizada para la siguiente subcapa (k+1). Con este método secuencial, los autoencoders pueden establecer una jerarquía de apilamiento, lo que implica que cada subcapa posee un nivel más alto de abstracción y la subcapa más alta contendrá el nivel más alto de estructuración y representatividad de la información de entrada. La Figura 8-3 presenta la configuración del modelo para calidad del aire. En la primera capa se ingresa un predictor obtenido mediante una regresión lineal LR, aunque se recomienda utilizar un predictor obtenido mediante SVR. Luego se aplica el modelo SAE.

Figura 8-3 Arquitectura deep learning SAE



Fuente: Deep learning architecture for air quality predictions, 2016

Este entrenamiento fue aplicado a la ciudad de Beijing para MP2,5 horario durante el periodo enero 2014 a mayo 2016, utilizando 12 estaciones de monitoreo y aproximadamente 20196 datos observados por estación. El modelo se aplicó utilizando un 60% de los datos para el set de entrenamiento, 20% como set de validación y 20% como test set. Los resultados obtenidos se validaron utilizando los estadígrafos de error cuadrático medio ECM, Sesgo medio SM y sesgo normalizado SN como se presenta en la Tabla 8-5.

Tabla 8-5 Evaluación estadística modelo SAE Beijing

Intervalos de tiempo	ECM	SM	SN %
4	15.39	8.6	26.52
6	15.60	8.7	26.54
8	14.96	9.0	21.75
10	17.32	9.5	25.50
12	17.31	9.2	26.52

Fuente: Deep learning architecture for air quality predictions, 2016

8.2.1 TensorFLow

TensorFlow es una herramienta que se basa en una plataforma de código abierto para el aprendizaje automático (Machine learning) y actualmente posee una de las comunidades más grandes de usuarios, a nivel mundial. Esta herramienta permite mejorar algunos de los datos pronosticados en base a la aplicación de algoritmos de machine learning, entregando amplia documentación para la implementación de modelos basados en técnicas SVM para el análisis de series de tiempo.

8.3 Análisis de los sistemas de pronóstico

En base a la revisión de herramientas y metodologías utilizadas a nivel nacional e internacional para los sistemas de pronóstico de calidad del aire actuales, se observa que la mayoría se basa en la implementación de un modelo determinístico, basado en un modelo meteorológico, un modelo de emisiones y un modelo de transporte y dispersión, de preferencia fotoquímico.

En cuanto a los sistemas de pronóstico meteorológico se observa una amplia variedad de éstos, para el caso nacional el WRF es el que se encuentra mayormente implementado.

Como existen avances realizados por NOOA y NWS para el desarrollo de FV3GFS, se presenta una comparación de ambos para tener en cuenta el modelo FV3. La evaluación de desempeño comparativo[108] entre FV3 y WRF-ARW se realizó en el marco del "2018 NOAA HWT Spring Forecasting Experiment" donde se evaluaron tres variables de superficie: temperatura de 2 m, temperatura de punto de rocío de 2 m y velocidad del viento a 10 m. En este aspecto el conjunto multifísico (WRF-ARW) tendió a superar al de la física FV3 en cuanto a temperatura y temperatura del punto de rocío, mientras que para velocidad del viento FV3 presentó un mejor desempeño. En términos generales FV3 y WRF mostraron una tendencia a subestimar temperatura y temperatura del punto de rocío, y ambos representaron bien el ciclo diario.

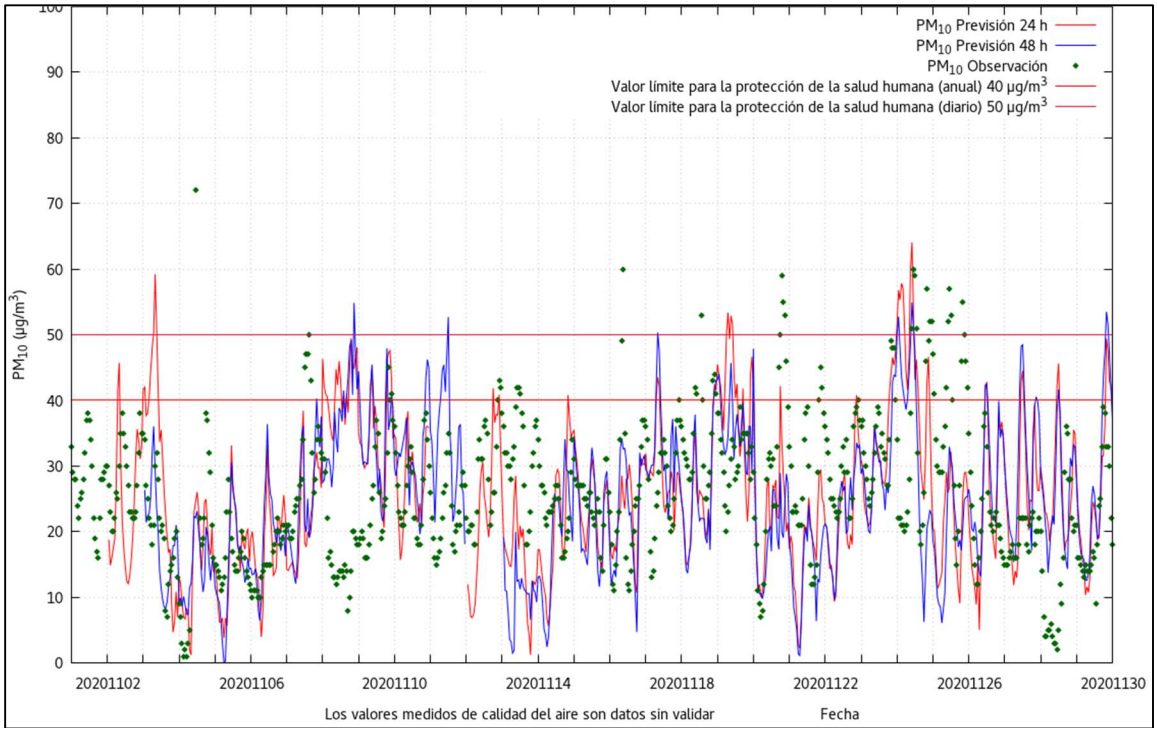
Se presentan también los resultados obtenidos por el sistema de pronóstico de calidad del aire implementado en zona costera con resolución de 1 km en la ciudad de Barcelona. Este es el sistema CALIOPE descrito anteriormente, que se basa en las herramientas WRF-CMAQ y presenta una evaluación continua desde 2009, con buenos resultados para los contaminantes de interés de nuestra zona de estudio. Se seleccionó la estación Saint André de Besós debido a que se encuentra en la zona costera de Barcelona, y está muy cercana a la central termoeléctrica Besós de ENDESA (situación similar a la zona de estudio, aunque la central de Endesa funciona únicamente a Gas natural). La Figura 8-4 y la Figura 8-5 presentan los resultados del pronóstico para material particulado MP10 y MP2,5 uno para la estación costera y el otro para una estación al interior del continente en Toledo. Esta última se eligió para ver si existen diferencias significativas en el pronóstico, asociado a su resolución espacial, pues la estación de Barcelona se ubica dentro un pronóstico a 1 km de resolución y la de Toledo en uno de 4 km de resolución; de la simple observación de ambos gráficos se infiere una buena representación entre los datos pronosticados y observados. Para analizar el desempeño del modelo se presenta la evaluación realizada por el equipo de Calíope, en particular se presentan los análisis para los contaminantes de interés en la zona de estudio es decir MP2.5 y SO2. Esta evaluación[109] se realizó utilizando datos de las 443 estaciones de España que enviaron datos de manera operativa, de estas el 45% son estaciones urbanas, 29% estaciones suburbanas y 26% estaciones rurales.

[108] Blank, Assessment of FV3 vs WRF-ARW multi-physics ensemble performance available in the CLUE during the HWT-SFE, 2018.

[109] Evaluación del sistema de pronóstico de calidad del aire CALIOPE en España, 2014, Barcelona Super Computing Center BSC.

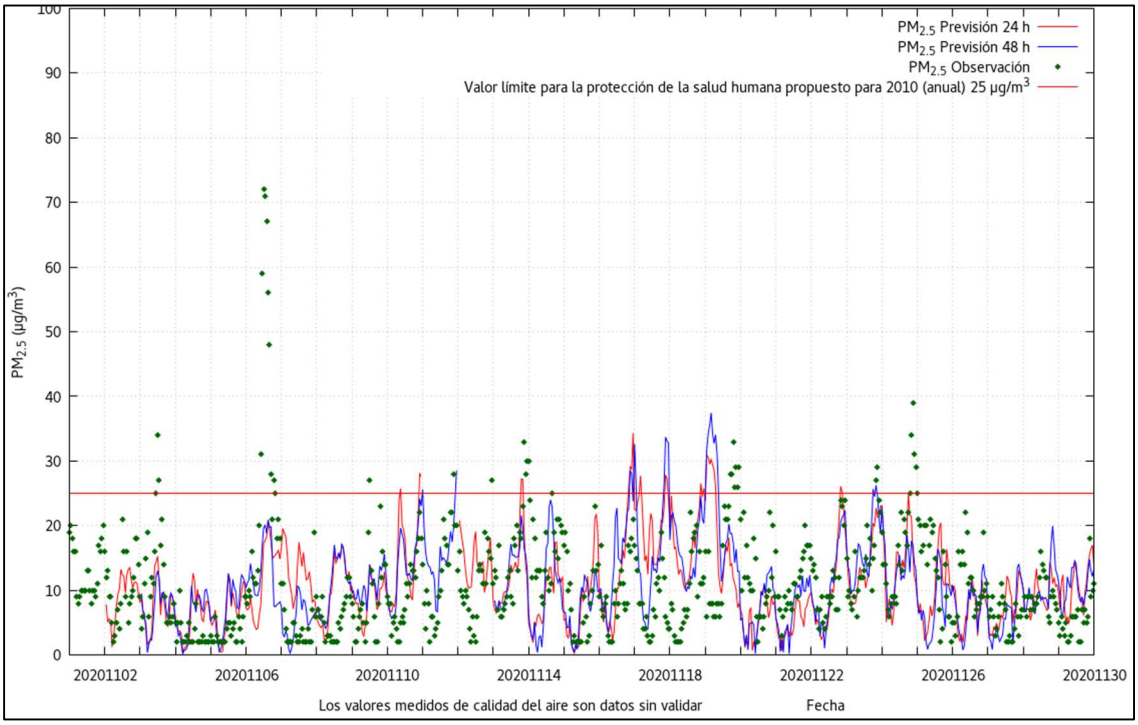
La evaluación de todas las estaciones se muestra en laTabla 8-6, en la que se observa que el pronóstico para SO_2 presenta un buen desempeño con un sesgo de ± 3 µg/m^3 y un error menor a 5 µg/m^3. El pronóstico de MP2,5 también presenta un buen desempeño, con un sesgo ± 5 µg/m^3 y un error entre 5 y 15 µg/m^3.

Figura 8-4 Pronóstico MP10 a 24 y 48 h, estación Saint André de Besós, zona costera, res. 1km, Nov 2020.



Fuente: elaborado en base a http://www.bsc.es/caliope/es/evaluacion

Figura 8-5 Pronóstico MP2,5 a 24 y 48 h para estación Toledo, res. 4km, Nov 2020



Fuente: elaborado en base a http://www.bsc.es/caliope/es/evaluacion

Tabla 8-6 Evaluación del pronóstico Calíope

SO2	Sesgo medio	58% de las estaciones presentan un comportamiento "Muy Bueno", con un sesgo medio anual de ± 3 µg/m3 en las concentraciones horarias de SO2.
	Coeficiente de correlación	5% de las estaciones presentan un comportamiento "Muy Bueno" (r > 0.40) y un 5% "Bueno" (0.30 < r < 0.40). Más de la mitad (56%) de las estaciones presentan un comportamiento "Muy Malo" (r ≤ 0.10).
	Error cuadrático medio	47% de las estaciones presenta un comportamiento "Muy Bueno" (RMSE< 5 µg/m3) 45% presentan un comportamiento "Bueno" (5 µg/m3 ≤ RMSE < 15 µg/m3).
MP2.5	Sesgo medio	96% de las estaciones presentan un comportamiento "Muy Bueno", con un sesgo medio anual de ± 5 µg/m3 en las concentraciones horarias de PM2.5
	Coeficiente de correlación	22% de las estaciones presentan un comportamiento "Muy Bueno" (r > 0.55) 41% "Bueno" (0.40 < r ≤ 0.55).
	Error cuadrático medio	91% de las estaciones presentan un comportamiento "Bueno" (5 µg/m3 ≤ RMSE < 15 µg/m3).

Fuente: Evaluación del sistema de pronóstico de calidad del aire CALIOPE en España, 2014, Barcelona Super Computing Center BSC

Entre las herramientas más utilizadas y validadas para la modelación y pronóstico del transporte y dispersión de material particulado están los modelos CMAQ y WRF-CHEM. Los resultados de estos modelos a su vez son mejorados mediante post procesamiento estadístico.

En cuanto a WRF-CHEM existe poca información del desempeño del modelo a nivel nacional. Es por esto, que se optó por presentar además otras alternativas de sistemas de pronóstico que presenten condiciones asimilables a la zona de estudio (zona costera, presencia de termoeléctricas).

8.4 Conclusión

A nivel país se cuenta con experiencia en el modelo WRF-CHEM, este se encuentra implementado mediante el MMA en varias ciudades como Santiago, Rancagua, Temuco y Coyhaique.

A nivel internacional el modelo WRF se encuentra ampliamente implementado para meteorología y para calidad del aire se observa bastante el uso de CMAQ, el cual podría ser una buna alternativa, pero existe escasa información de su implementación en el País, más aún con fines de pronóstico operacional.

En base al análisis de las distintas herramientas y metodologías de pronóstico presentadas se observa que la herramienta con mayor potencial de implementación en la zona de estudio es el modelo de pronóstico meteorológico WRF acoplado al módulo fotoquímico CHEM para el transporte de contaminantes, principalmente debido a que es una herramienta que se mejora y actualiza constantemente debido a sus amplia comunidad de usuarios y que ya se encuentra implementada en nuestro país con fines de pronóstico operacional, por lo que existe experiencia en cuanto a su uso. En cuanto al objetivo de este estudio es importante mencionar que es factible técnicamente la implementación de los resultados del desarrollo del Factor meteorológico en las salidas de WRF para potenciar su desempeño.

9 Producto viii. Resultados del ejercicio de modelación de calidad del aire con fines de pronóstico

9.1 Meteorología observada

En el presente capítulo se presentan los resultados del ejercicio de modelación de calidad del aire con fines de pronóstico.

El objetivo de este ejercicio fue evaluar el comportamiento del modelo, realizando un análisis de las concentraciones de SO_2 y MP2,5 simuladas y observadas en los receptores representados por las estaciones Concón, Quintero y Los Maitenes.

El escenario a evaluar corresponde al período 01 de enero al 31 de diciembre 2018, y el emplazamiento de la zona del ejercicio de modelación se ubica dentro de las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví. La zona del ejercicio está emplazada en una zona costera, por lo que se observa un comportamiento de vientos predominantes, con alguna componente del Este (E, NE, SE) durante el período nocturno y Oeste (W, NW, SW) durante el período diurno, flujos asociados a la forzante radiativa y al proceso de calentamiento y enfriamiento del continente respecto del océano, información que se desarrolló ampliamente en la caracterización meteorológica de la zona de estudio.

Información y datos disponibles:

- La base de datos meteorológica se generó utilizando el modelo de mesoescala Weather Research and Forecasting (WRF).
- El inventario de emisiones fue entregado por el mandante y corresponde al inventario del PDA de la zona.
- El modelo utilizado para el transporte y dispersión de contaminantes fue CALPUFF.

9.2 Meteorología observada

La meteorología de superficie utilizada para la caracterización meteorológica del dominio de modelación se obtuvo de las estaciones presentadas en la Tabla 9-1. Estas estaciones se seleccionaron debido a su ubicación, debido a que se emplazan viento arriba o abajo de las principales fuentes, capturando el comportamiento diario de las emisiones de estas.

Tabla 9-1 Estaciones de monitoreo

Estación	**Coordenadas UTM Datum WGS84 H19**		**Variables observadas**	**Período monitoreo utilizado**
	X	Y		
Concón	264737	6354228	VV, DV, T, HR, RS	2018
Los Maitenes	270073	6372171	VV, DV	
Quintero	262528	6371087	VV, DV	

Fuente: Elaboración propia con datos MMA

9.3 Modelación meteorológica

La base de meteorología modelada para este ejercicio, se realizó utilizando el modelo Weather Research and Forecasting (WRF), el que fue seleccionado en base a las recomendaciones entregadas por la Guía para el uso de Modelos de Calidad del Aire en el SEIA, debido a las características y ubicación del dominio modelado, necesario para simular una meteorología heterogénea.

9.3.1 Descripción del modelo WRF

El modelo WRF es un sistema de simulación numérico para predicción meteorológica (Numerical Weather Prediction NWP), diseñado tanto para aplicaciones de investigación, como de pronóstico meteorológico.

WRF incluye dos núcleos dinámicos (ARW y NMM), un sistema de asimilación de datos, y una arquitectura de software diseñada para permitir ejecuciones distribuidas o paralelas y escalabilidad de sistema. Implementa una extensa gama de aplicaciones meteorológicas en escalas que van desde los metros a los miles de kilómetros.

El desarrollo de WRF empezó a fines de los 90, como una colaboración entre el Centro Nacional para la investigación Atmosférica (NCAR), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), representada por los Centros Nacionales para Predicción Medioambiental (NCEP) y el Laboratorio de investigación de Ciencias de la Tierra, la Agencia de Meteorología de Fuerza Aérea estadounidense (AFWA), el Laboratorio de Investigación Naval (NRL), la Universidad de Oklahoma (OU), y la Administración de Aviación Federal (FAA).

WRF permite a los investigadores producir simulaciones basadas en las condiciones atmosféricas actuales (a partir de observaciones y análisis) o condiciones simuladas. Permite realizar pronóstico operacional, con una plataforma computacional eficiente, incorporando los avances en física, análisis numérico y de asimilación de datos, gracias a la contribución de la creciente comunidad de investigadores. El sistema de software es de dominio público y está disponible de manera gratuita para su comunidad de usuarios.

WRF se encuentra operativo actualmente en el NCEP, Centros de investigación meteorológica y, en su configuración como pronóstico operacional, dentro de laboratorios, universidades y empresas.

WRF posee una gran comunidad de usuarios en todo el mundo (más de 48,000 registrados en más de 160 países), y cada año se publican ejercicios y tutoriales en NCAR.

El sistema de procesamiento de WRF se basa en 2 núcleos dinámicos ARW y NMM, los que incluyen los esquemas de trabajo para la advección, el gradiente de presión, Coriolis, flotabilidad, filtros, difusión y el tiempo de integración.

9.3.2 Configuración del modelo WRF Ejercicio 1

El modelo meteorológico WRF 3.8 se implementó para la zona de estudio que comprende Concón, Quinteros y Puchuncaví, utilizando 3 grillas anidadas. La configuración del dominio se presenta en la Tabla 9-2.

Respecto del uso de suelos utilizado en la modelación se obtuvieron los archivos de USGS y MODIS de la NASA, y para los datos de elevación se utilizó USGS topo30.

Los esquemas de parametrización utilizados en esta modelación describen la interacción de los fenómenos que intervienen en la microfísica de la atmósfera, las interacciones suelo-atmósfera, y particularmente importante en el fenómeno de la dispersión, el comportamiento de la altura de la capa de mezcla.

Tabla 9-2 Configuración modelo meteorológico

Zona estudio	**Configuración**
Período modelado	2018
Fecha inicio	31/12/2017 00:00
Fecha fin	02/01/2019 00:00
Resolución temporal	1 hora
NEST (Anidamiento)	3 dominios anidados
Resolución espacial	1 km
Resolución vertical	27 niveles
Coordenadas punto origen central proyección Lambert Conformacional Cónica LCC	
Latitud punto central ref_lat	-32.79534
Longitud punto central ref_lon	-71.46727
truelat1	-27.79534
truelat2	-37.79534
stand_lon	-71.46727

Fuente: elaboración propia

La configuración de los esquemas se detalla en la Tabla 9-3. Cabe mencionar que este esquema de parametrización ha sido utilizado con buen desempeño por el consultor para simulaciones de alta resolución ~1km.

Tabla 9-3 Parametrización WRF

Parametrización	**Descripción**
Microfísica de la atmósfera WRF Single-Moment 6-class mp_physics=6	Esquema microfísico que considera los procesos de formación de hielo, nieve y granizo. Recomendado para simulaciones de alta resolución.
Esquemas de radiación RRTMG ra_lw_physics=1	Onda larga. Esquema adecuado que utiliza tablas de consulta para mejorar su eficiencia. Representativo para múltiples bandas, gases traza y especies de microfísica.
Esquemas de radiación Dudhia ra_sw_physics=1	Onda corta. Esquema que presenta un sistema simple de integración descendente, considera la absorción del vapor de agua y la absorción y albedo de las nubes.
Esquema capa superficial Similaridad sf_sfclay_physics=1	Esquema de similaridad Monin-Obukhov: basado en Monin-Obukhov con subcapa viscosa Carslon-Boland, teoría de similaridad estándar utiliza tablas de consulta.

Parametrización	Descripción
Esquema suelo Similaridad sf_surface_physics=1	Modelo difusión térmica de 5 capas
Esquema de capa limite planetariaYSU bl_pbl_physics=1	Esquema no local basado en la Teoría K (modelo de difusión vertical) con un tratamiento específico para la capa de arrastre, y un perfil parabólico-K en la capa de mezcla instable.
Esquema de cúmulos New Kain-Fritsch (cu_physics=1)	Esquema basado en una sub grilla para las nubes convectivas, utiliza el enfoque de flujo masico para representar los flujos verticales de las corrientes ascendentes y descendentes.

Fuente: Elaboración propia en base a descripción de NCAR.

Las variables específicas de configuración se entregan en los Anexos en formato digital, con los archivos adjuntos namelist.input y namelist.wps

9.3.3 Configuración del dominio de modelación

El dominio modelado se extrajo de la grilla de anidamiento N° 3 del modelo WRF. La dimensión del dominio es de 32x32 celdas de grilla cada una de 1x1 km. El modelo MMIF se utilizó como modelo de diagnóstico para extraer los datos modelados de WRF hacia el modelo de dispersión CALPUFF. Este dominio abarca las emisiones de las principales fuentes de emisión de la zona y los receptores de interés para este ejercicio.

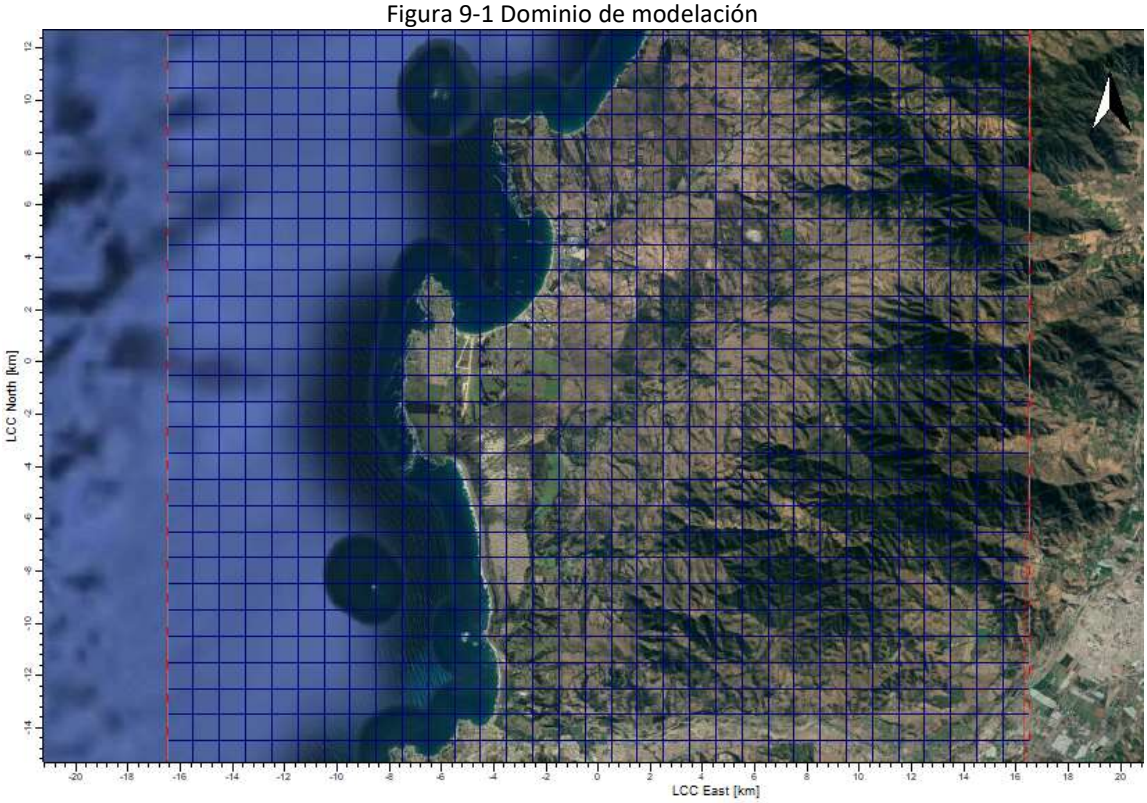
Tabla 9-4 Características dominio de modelación

Características	Descripción
N° Celdas eje x	32
N° Celdas eje x	32
Dimensión de las celdas	1x1 km

Fuente: Elaboración propia

La Figura 9-1 Dominio de modelación, presenta en rojo la grilla computacional, (dominio N° 3 del modelo WRF) y en azul la grilla meteorológica del modelo.

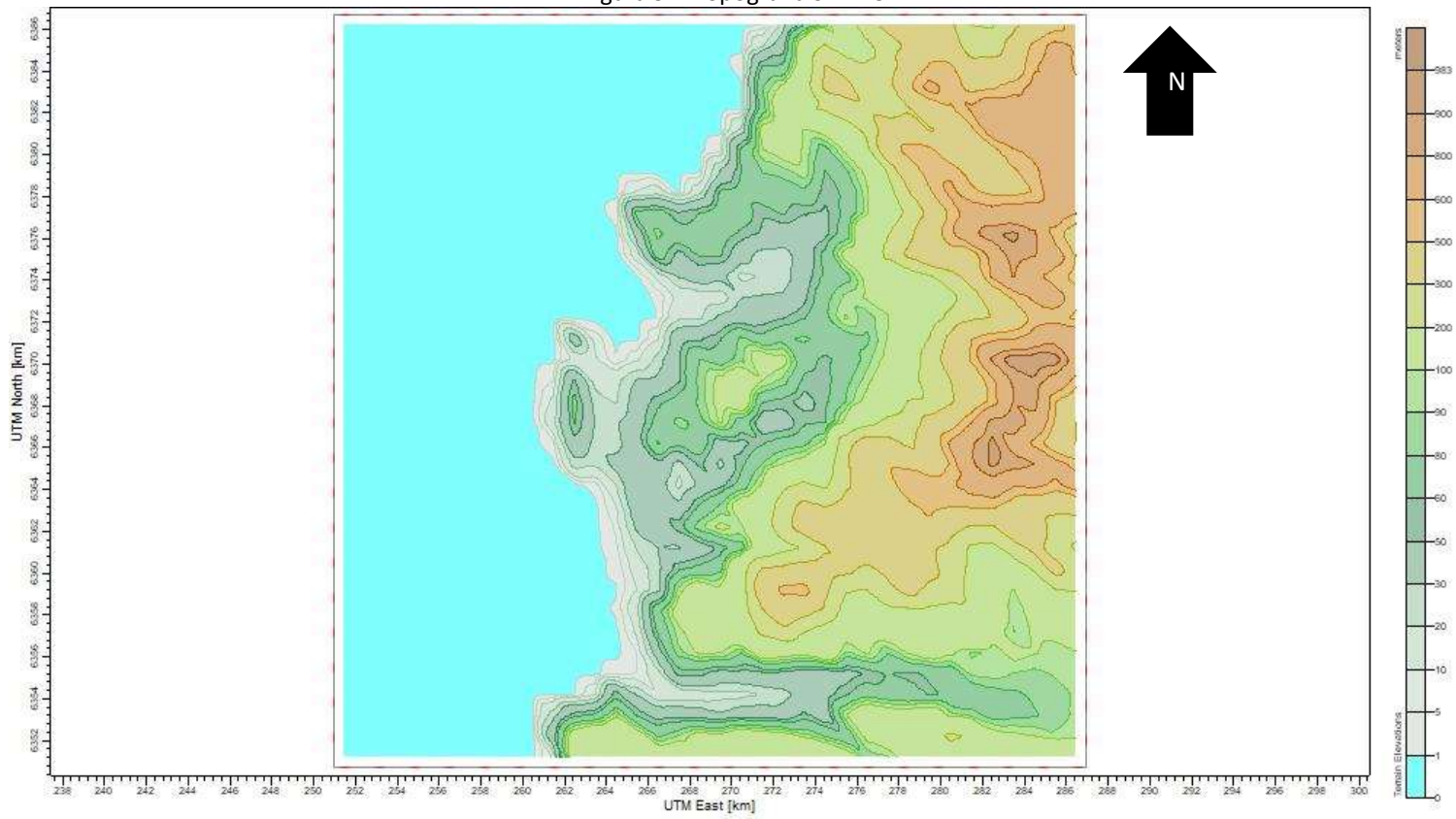
Figura 9-1 Dominio de modelación



Fuente: Elaboración propia, utilizando Google Earth

La topografía SRTM3[110] utilizada en este ejercicio de modelación se presenta enla Figura 9-2. Esta es interpolada a la resolución de grilla de 1 km de la grilla meteorológica del modelo CALPUFF, con una resolución de aproximadamente 90 m.

Figura 9-2 Topografía SRTM3

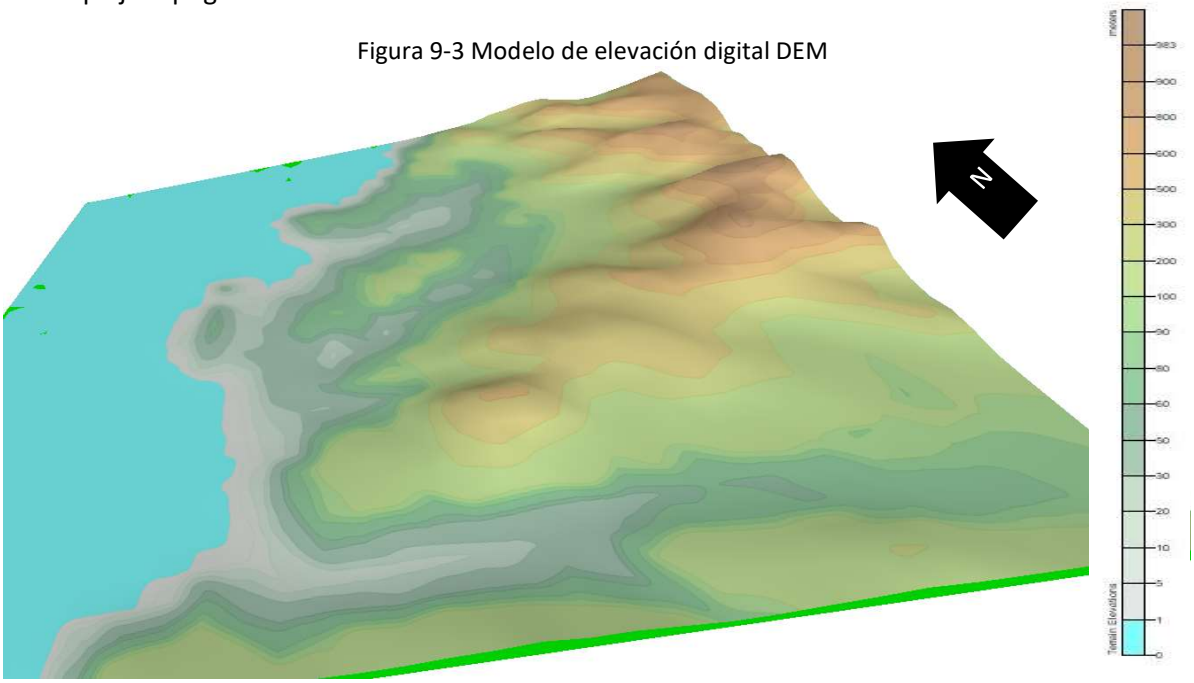


Fuente: Elaboración propia utilizando CALPUFF VIEW

[110]Shuttle Radar Topography Mission (https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/)

La Figura 9-3 se presenta para mostrar de mejor manera, mediante un modelo de elevación digital, la compleja topografía de la zona.

Figura 9-3 Modelo de elevación digital DEM



Fuente: Elaboración propia utilizando CALPUFF VIEW

9.3.4 Resultados del modelo meteorológico

Los resultados de la modelación meteorológica se presentan mediante el análisis estadístico de los datos de viento modelados para el período 2018. Para realizar la comparación se utilizan los datos observados en las estaciones de monitoreo Concón, Quintero y Los Maitenes, descritas en la Tabla 9-1 Estaciones de monitoreo.

Los datos meteorológicos extraídos del modelo corresponden a los datos de la celda-grilla de 1x1 km que coincide con la ubicación de cada estación de monitoreo a comparar. Es por esto que debe tomarse en cuenta que los datos extraídos desde la grilla son representativos de toda el área de 1x1 km, por lo que pueden verse influidos por la compleja geomorfología de la zona. Los datos son extraídos para una altura de 10 m, similar a la altura de medición de los datos por el anemómetro de la estación de monitoreo.

La comparación entre los datos modelados y observados se realiza mediante histogramas de frecuencia de dirección de viento (los que permiten representar de mejor manera que las rosas de viento el comportamiento del ciclo diario), los ciclos diarios de velocidad de viento, ciclos estacionales y los estadígrafos descriptivos que se describen a continuación.

SM	Sesgo medio (SM) representa la tendencia del modelo a sobrestimar o subestimar las condiciones reales, cuantificando así el error sistemático del modelo. Para valores negativos el modelo tiende a subestimar el valor de las variables modeladas, y para valores positivos, el modelo tiende a sobreestimar.	$\frac{1}{n}\sum_{1}^{n}(M-O)$
ECM	Error Cuadrático Medio (ECM): Éste entrega la diferencia promedio entre los valores modelados y observados.	$\sqrt{\frac{\sum_{1}^{n}(M-O)^2}{n}}$
SF	Sesgo fraccional (SF) el sesgo se normaliza para que sea adimensional, variando entre los valores -2 y 2, siendo el 0 el valor para un modelo ideal.	$\frac{1}{n}\left(\frac{\sum_{1}^{n}(M-O)}{\sum_{1}^{n}\left(\frac{(M+O)}{2}\right)}\right)$

Donde

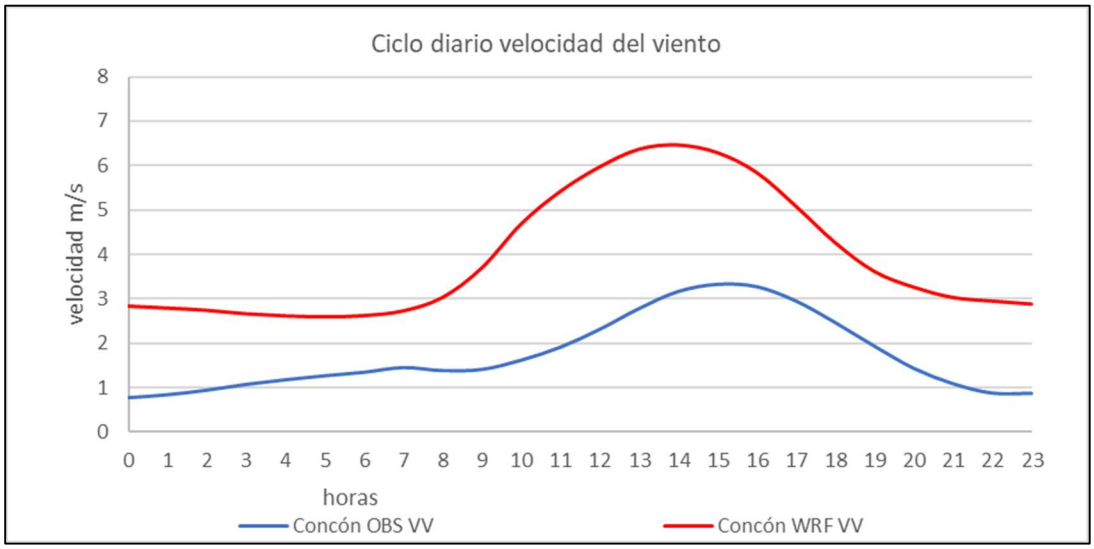
n número de datos, como pares validados
M Variables modeladas
O Variables observadas.

9.3.4.1 Magnitud del Viento

9.3.4.1.1 Concón

La Figura 9-4 presenta el ciclo diario de la magnitud del viento, modelada y observada, para el punto de grilla que contiene a la estación Concón. Se observa que la magnitud del viento modelada en rojo está por sobre la observada en azul, especialmente entre las 13 y 14 horas, en que alcanza un sesgo de hasta 3 m/s a las 14 horas, para luego disminuir durante la noche y madrugada.

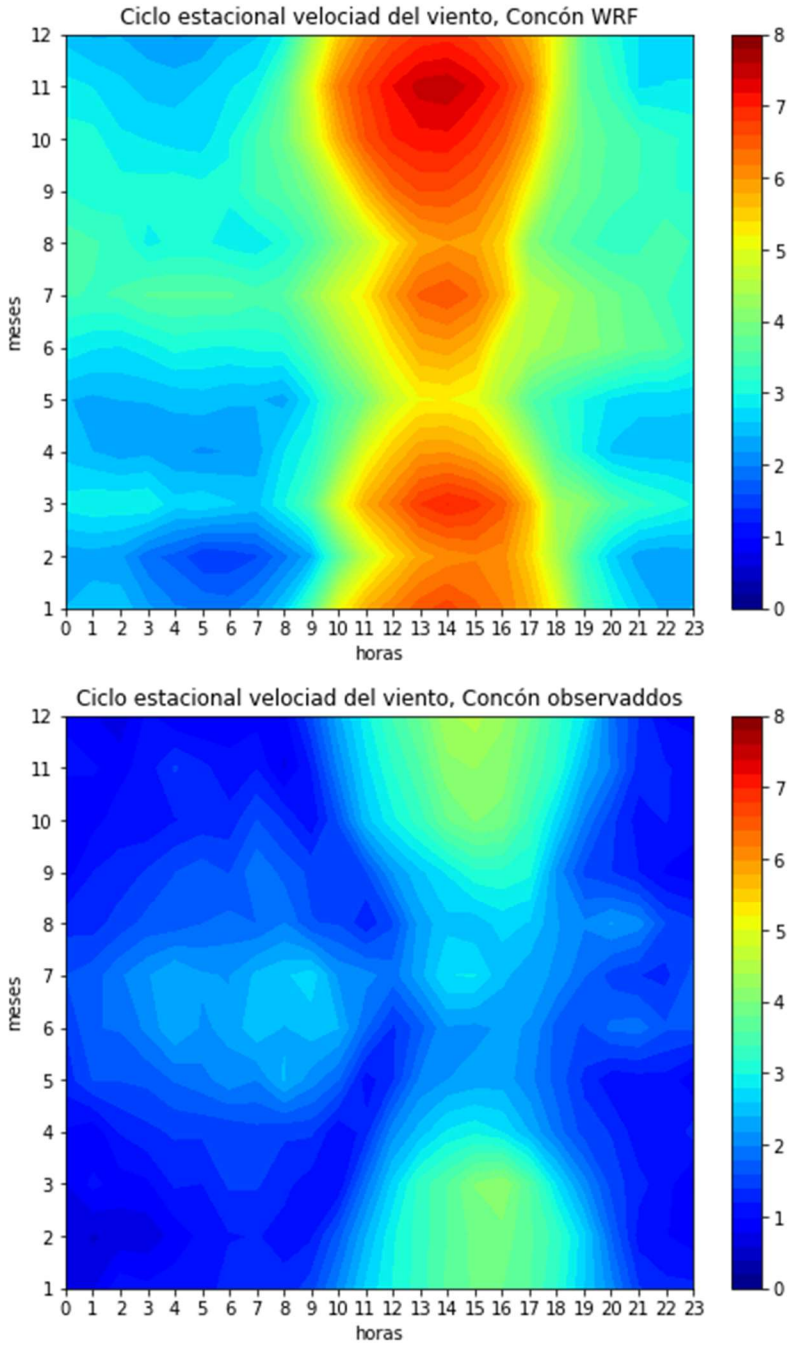
Figura 9-4 Ciclo diario de magnitud del viento modelada y observada, estación Concón 2018



Fuente: Elaboración propia

La Figura 9-5 presenta el Ciclo estacional de la magnitud del viento en la estación Concón para el período 2018. En el panel superior se presentan las velocidades modeladas y el panel inferior las velocidades observadas. Ambos ciclos presentan máximos durante horas de la tarde, los cuales son más acentuados durante los meses de verano. Es posible ver que el modelo presenta ciclos diarios y estacionales similares a los medidos, pero de mayor magnitud, especialmente en horas del mediodía y de la tarde en los meses de invierno. En los meses de invierno las magnitudes observadas tienden a mantener valores constantes que se prolongan durante la madrugada, efecto que no representa el modelo.

Figura 9-5 Ciclo estacional de magnitud del viento (m/s) en la estación Concón, 2018, panel superior datos modelados y panel inferior d atos observados.

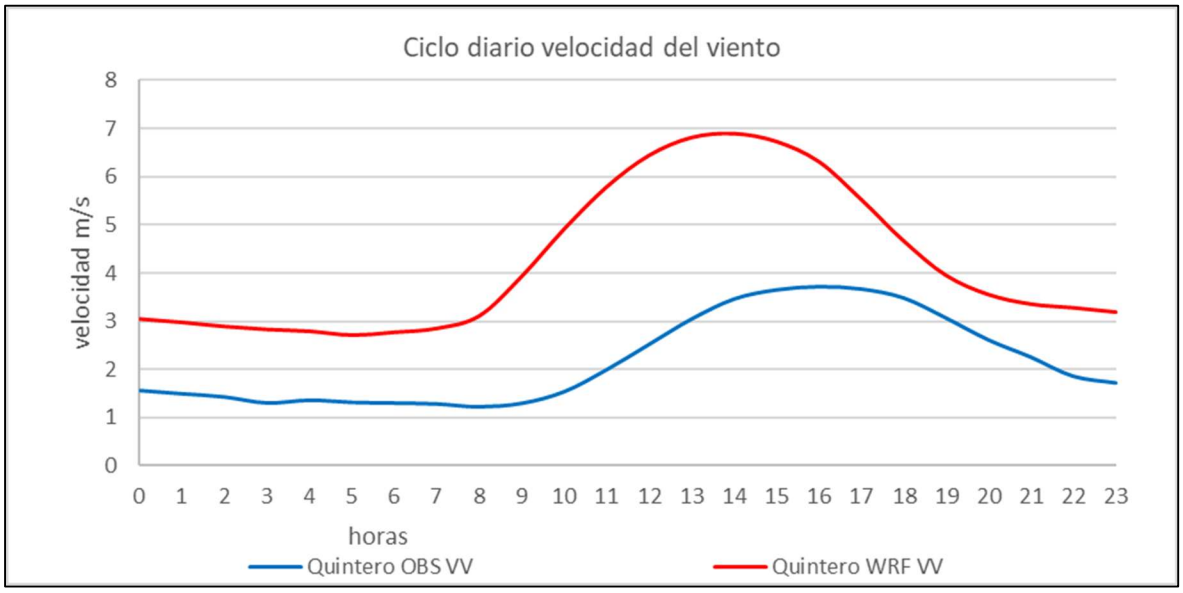


Fuente: Elaboración propia, utilizando Python – matplotlib

9.3.4.1.2 Quintero

La Figura 9-6 presenta el ciclo diario de la magnitud del viento, modelada y observada, para el punto de grilla que contiene a la estación Quintero. Se observa que la velocidad modelada en rojo está por sobre la observada en azul, especialmente entre las 12 y 13 horas, en que alcanza un sesgo de más de 3 m/s a las 12 horas, para luego disminuir durante la noche y madrugada.

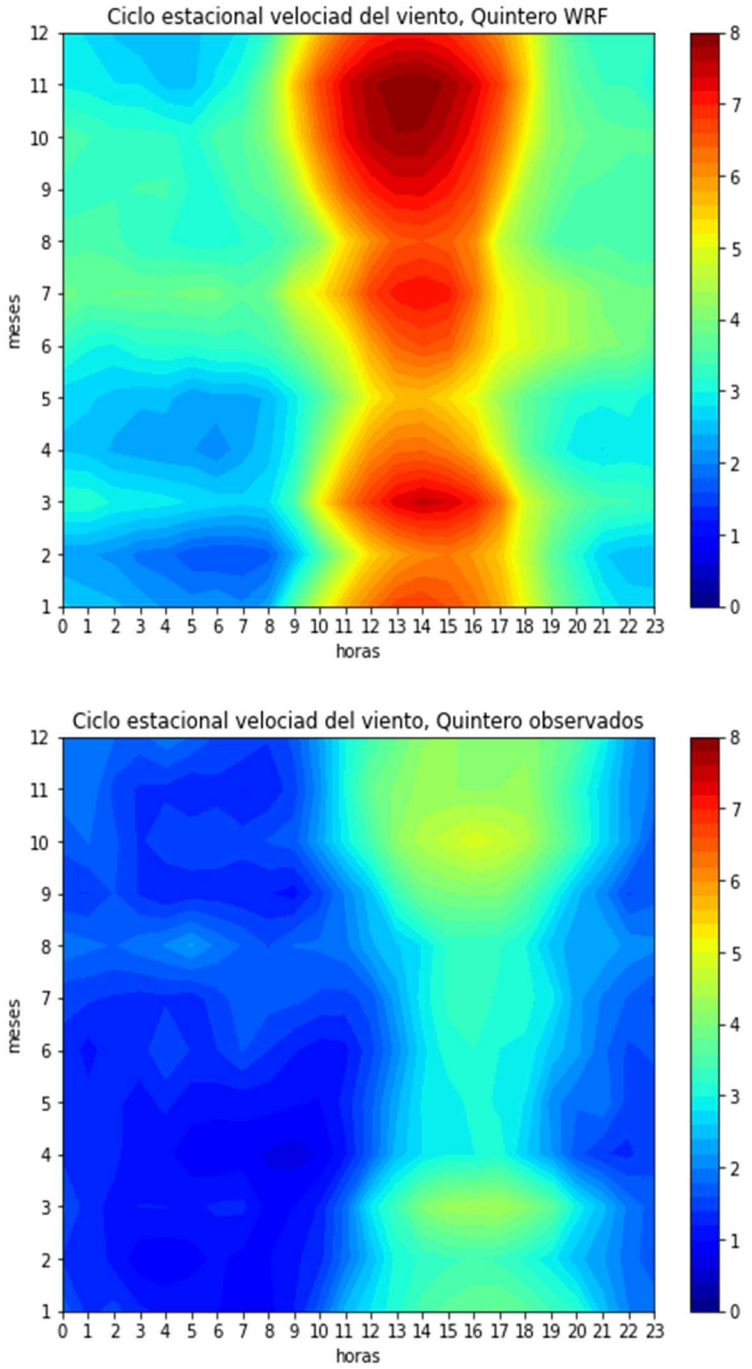
Figura 9-6 Ciclo diario de magnitud del viento modelada y observada, estación Quintero 2018



Fuente: Elaboración propia

La Figura 9-7 presenta el Ciclo estacional de magnitud del viento en la estación Quintero para el período 2018. En el panel superior se presentan las magnitudes modeladas y en el inferior las magnitudes observadas. Ambos ciclos presentan máximos durante horas de la tarde, los cuales son más acentuados durante los meses de verano. Es posible ver que el modelo presenta ciclos diarios y estacionales similares a los observados, pero de mayor magnitud, especialmente en horas del mediodía y durante la tarde en los meses de invierno.

Figura 9-7Ciclo estacional de magnitud del viento (m/s) en la estación Quintero, 2018, panel superior datos modelados y panel inferior datos observados.

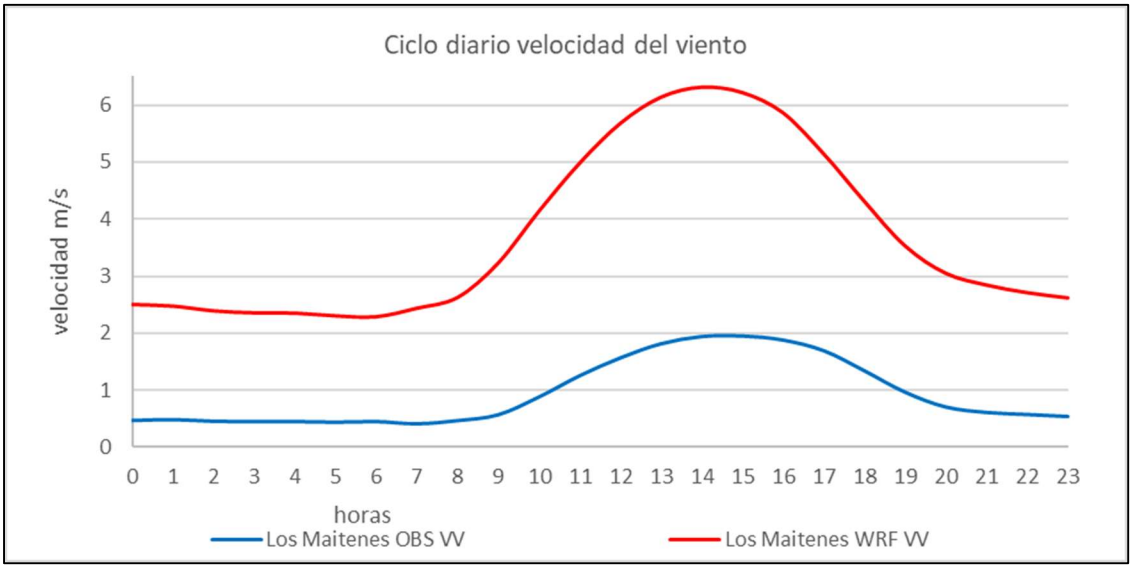


Fuente: Elaboración propia, utilizando Python – matplotlib

9.3.4.1.3 Los Maitenes

La Figura 9-8 presenta el ciclo diario de magnitud del viento horaria modelada y observada para el punto de grilla que contiene a la estación Los Maitenes. Se observa que la velocidad modelada en rojo está por sobre la observada en azul, especialmente entre las 14 y 15 horas, en que alcanza un sesgo de más de 4 m/s a las 14 horas, el sesgo se mantiene durante las horas de la noche y madrugada aproximadamente en 2 m/s.

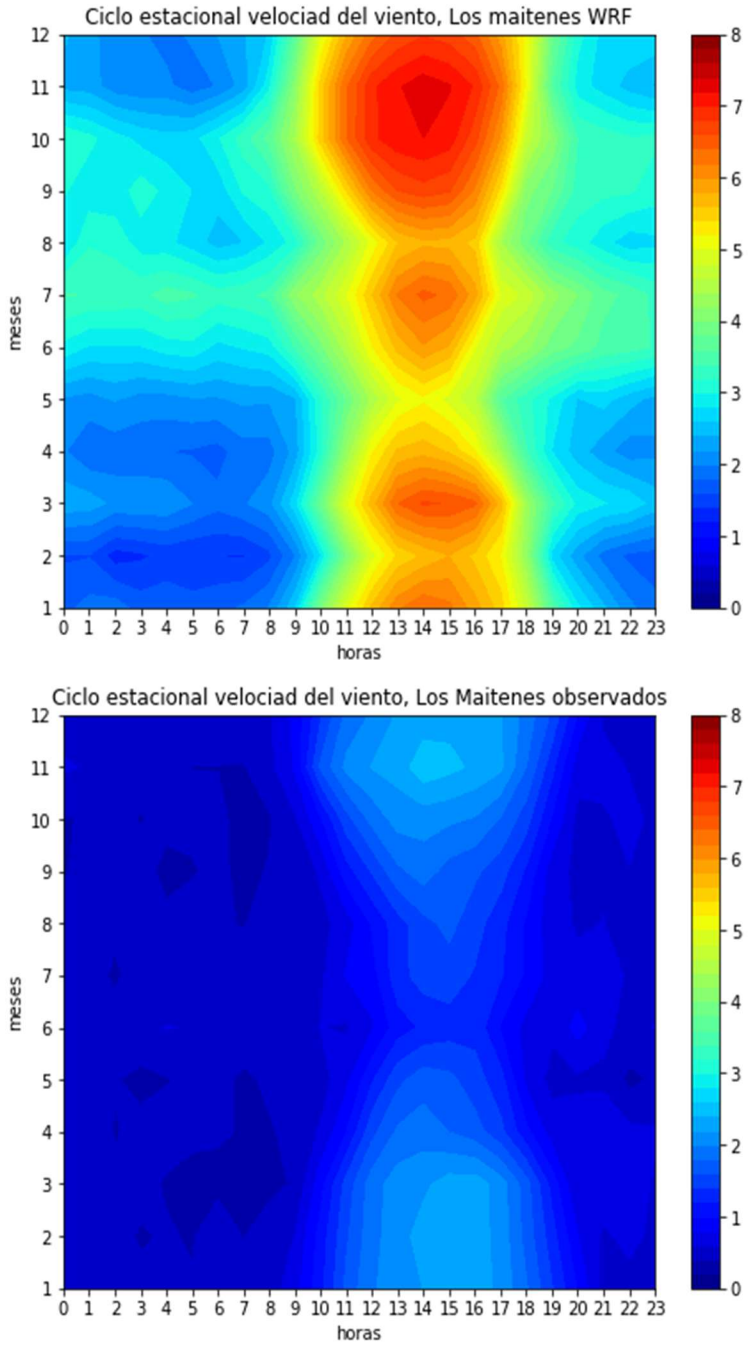
Figura 9-8 Ciclo diario de magnitud del viento modelada y observada, estación Los Maitenes 2018



Fuente: Elaboración propia

La Figura 9-9 presenta el Ciclo estacional de la magnitud del viento en la estación Los Maitenes para el período 2018. En el panel superior se presentan las magnitudes modeladas y el panel inferior las observadas. Ambos ciclos presentan máximos durante horas de la tarde, los cuales son más acentuados durante los meses de verano. El modelo presenta ciclos diarios y estacionales similares a los medidos, pero de mayor magnitud, especialmente en horas del mediodía y durante la tarde en los meses de verano. En los meses de invierno las magnitudes observadas son mucho menores que las modeladas.

Figura 9-9 Ciclo estacional de magnitud del viento (m/s) en la estación Los Maitenes, 2018, panel superior datos modelados y panel inferior datos observados.

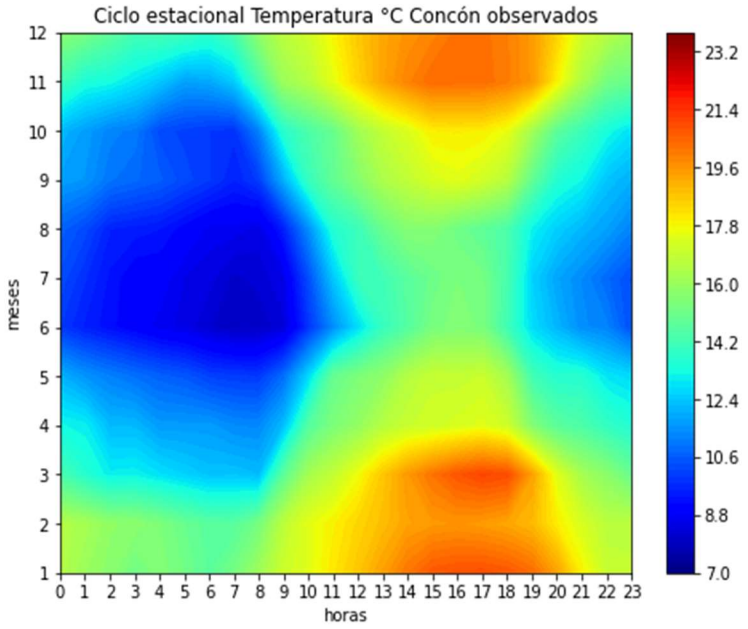


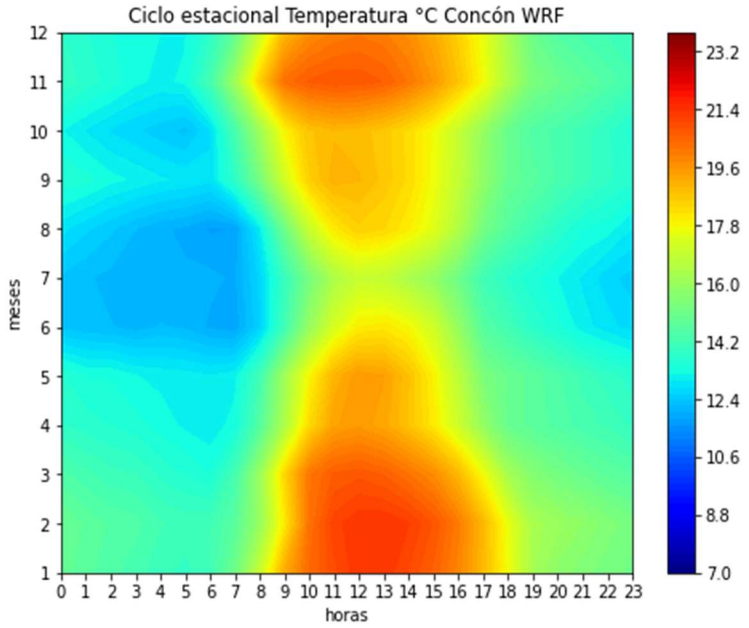
Fuente: Elaboración propia, utilizando Python – matplotlib

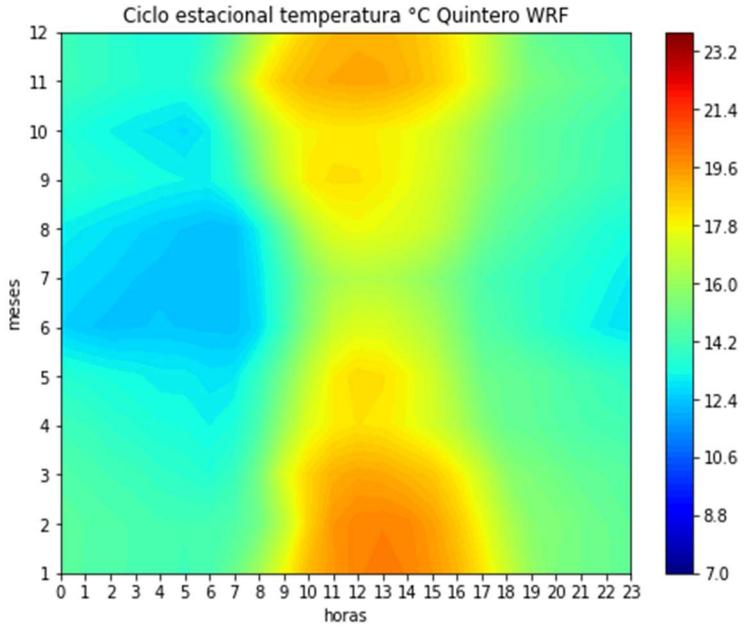
9.3.4.2 Temperatura

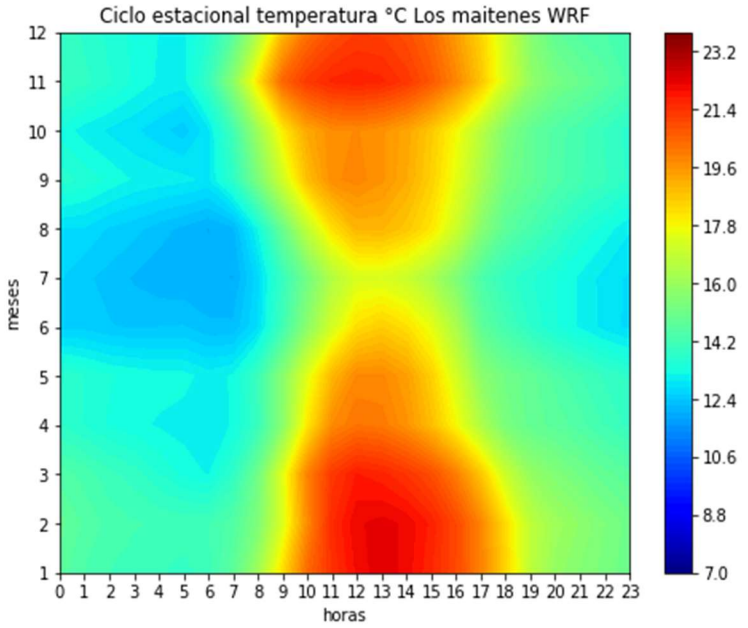
La Figura 9-10 presenta en su panel superior el ciclo estacional de temperatura en la estación Concón para el período 2018. Se observa claramente un ciclo estacional cálido de octubre a marzo y otro frío de abril a septiembre. En cuanto al ciclo diario este presenta un ciclo diurno con temperaturas máximas entre las 15 y las 17 horas. En cuanto a los valores modelados se presenta un ciclo diario y estacional similar al observado, con valores de temperatura similares durante el período diurno, pero con una menor amplitud. Para el período nocturno de los meses fríos se observan mayores temperaturas modeladas que observadas. Para las estaciones Quintero y Los Maitenes no se cuenta con datos observados, pero comparando entre las temperaturas modeladas se observa que las tres presentan un comportamiento similar. La estación Los Maitenes presenta las mayores temperaturas, mientras que Quintero presenta las menores.

Figura 9-10 Ciclo estacional de Temperatura °C, panel superior observada en la estación Concón y panel inferior modelada para Concón, Quintero y Los Maitenes.




Ciclo estacional Temperatura °C Concón WRF
meses
horas
23.2
21.4
19.6
17.8
16.0
14.2
12.4
10.6
8.8
7.0


Ciclo estacional temperatura °C Quintero WRF
meses
horas
23.2
21.4
19.6
17.8
16.0
14.2
12.4
10.6
8.8
7.0



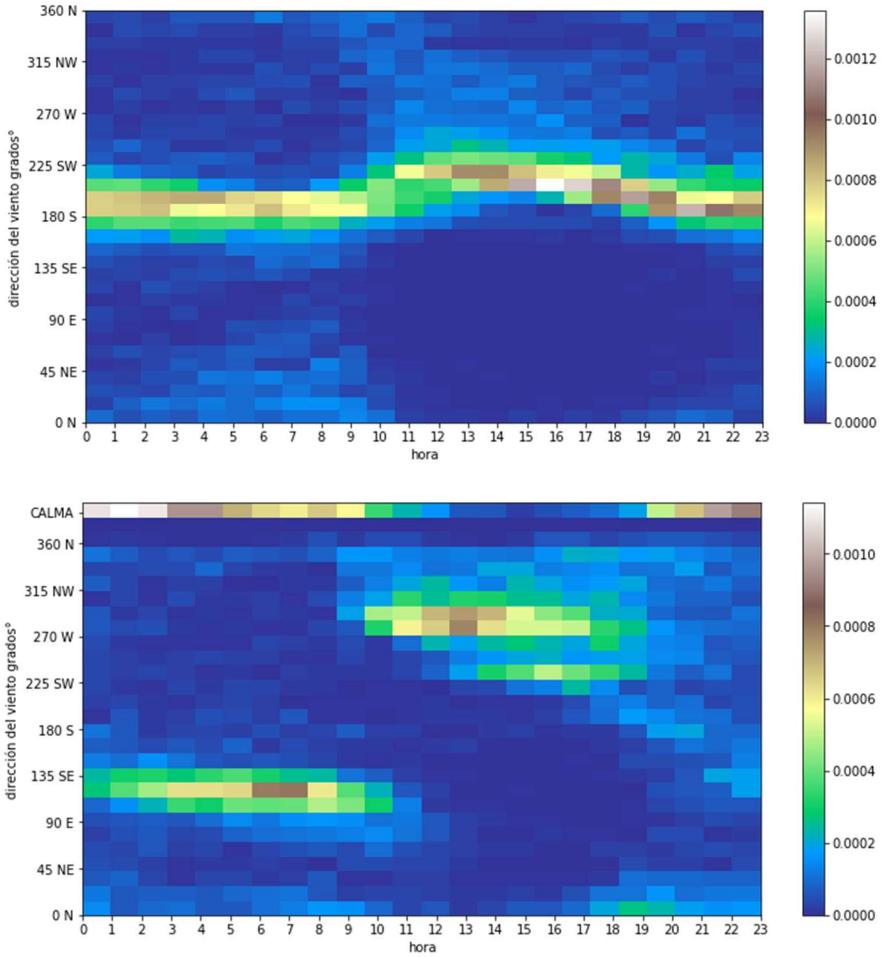
Fuente: Elaboración propia, utilizando Python – matplotlib

9.3.4.3 Dirección del Viento

9.3.4.3.1 Concón

La Figura 9-11 presenta mediante un histograma de frecuencias de base 1 (que entrega la densidad de probabilidad para cada intervalo, los que están normalizados de tal manera que la integral de probabilidad del histograma suma 1) el ciclo diario de dirección de viento para la estación Concón período 2018. Del panel superior se observa el comportamiento modelado. Durante las primeras horas de la madrugada presenta componente Sur, la que a comienzos de la mañana rota a una componente Suroeste, volviendo a una componente Sur durante la tarde. Los datos observados presentan durante las primeras horas de la madrugada una componente Sureste la cual rota hacia una componente Oeste durante las primeras horas del día; ésta se mantiene durante la tarde volviendo al Sureste a primeras horas de la noche. En el tope del panel inferior se presenta la frecuencia de Calmas para cada hora.

Figura 9-11 Ciclo diario de dirección de viento Concón 2018, panel superior modelada y panel inferior observada. Histograma de frecuencias en base 1.

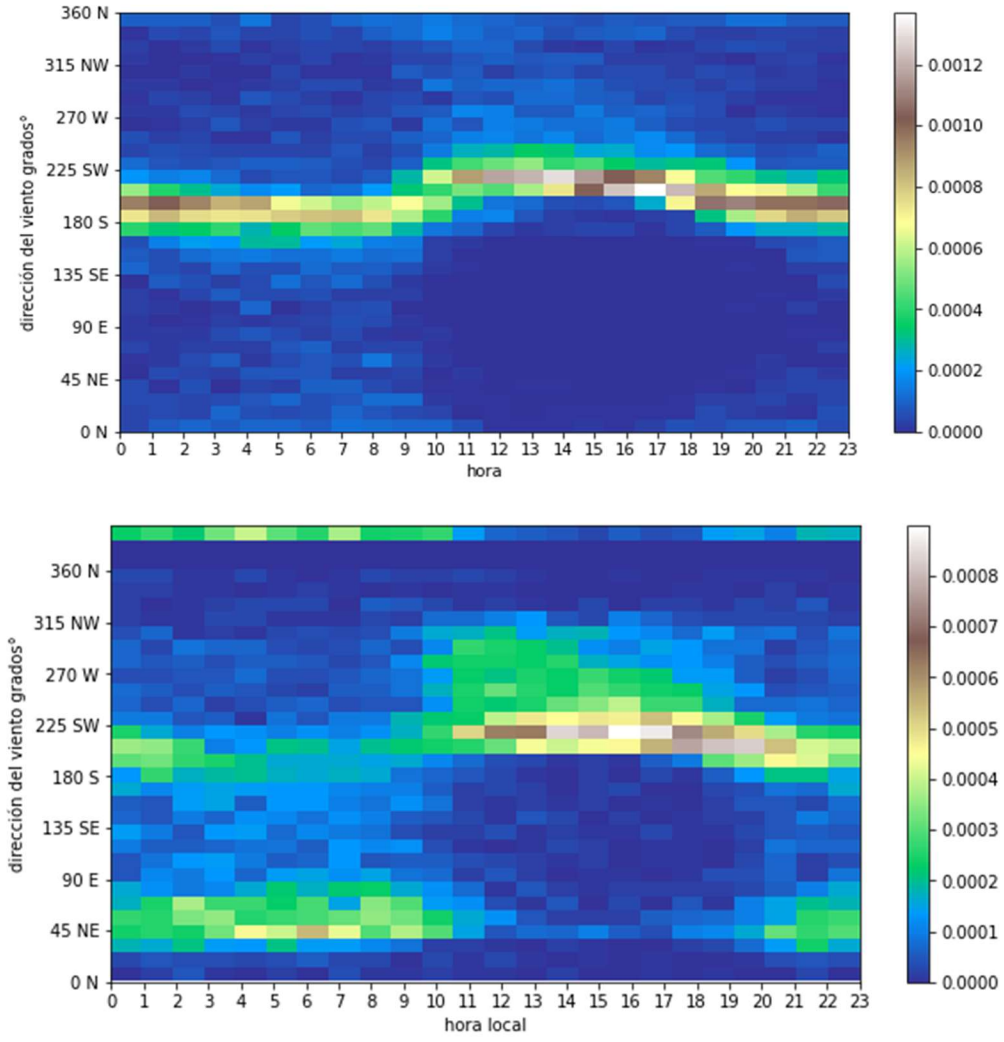


Fuente: Elaboración propia, utilizando Python – matplotlib

9.3.4.3.2 Quintero

La Figura 9-12 presenta mediante un histograma de frecuencias de base 1, el ciclo diario de dirección de viento para la estación Quintero, período 2018. Del panel superior se observa el comportamiento modelado. Durante las primeras horas de la madrugada presenta una marcada componente Sur, la que a comienzos de la mañana pasa a una componente Suroeste, y vuelve a una componente Sur durante la tarde. Los datos observados presentan durante las primeras horas de la madrugada una componente Noreste, la cual rota hacia una componente Suroeste durante las primera horas del día. Ésta se mantiene durante la tarde volviendo al Noreste a primeras horas de la noche. En el tope del panel inferior se presenta la frecuencia de calmas para cada hora.

Figura 9-12 Ciclo diario de dirección de viento Quintero 2018, panel superior modelada y panel inferior observada. Histograma de frecuencias en base 1.

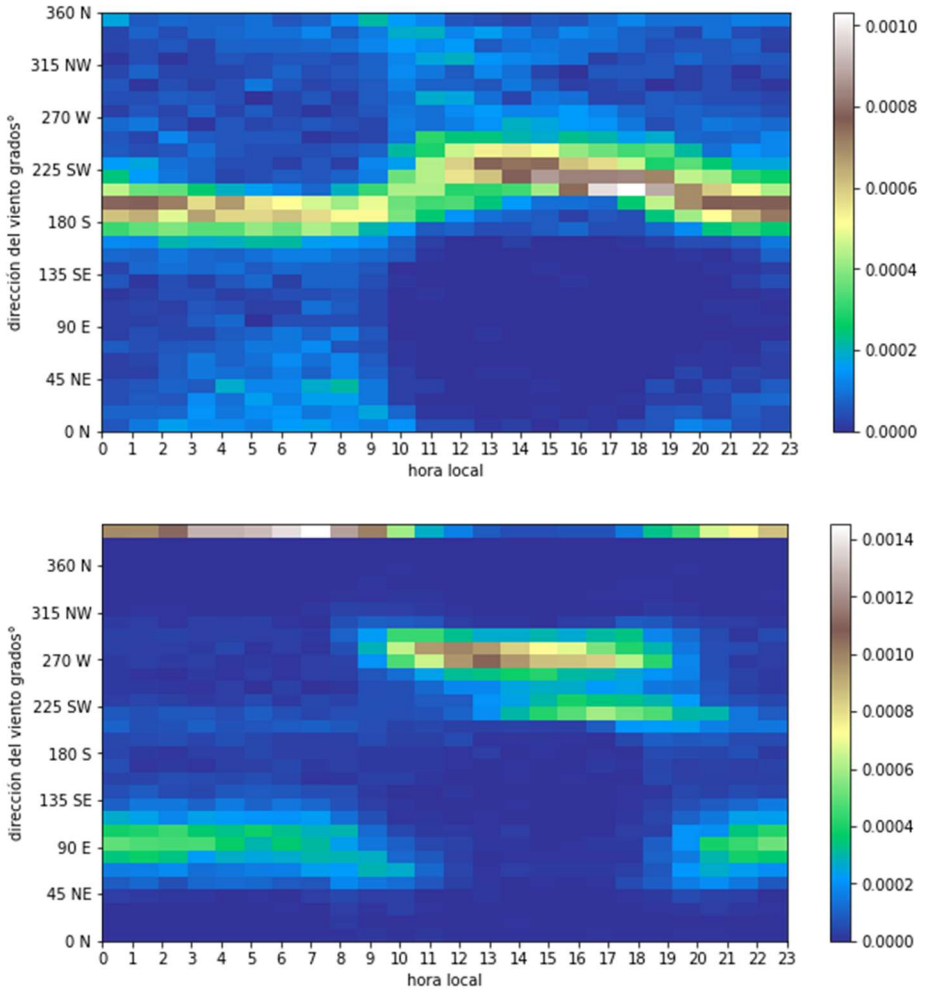


Fuente: Elaboración propia, utilizando Python – matplotlib

9.3.4.3.3 Los Maitenes

La Figura 9-13 presenta mediante un histograma de frecuencias de base 1 el ciclo diario de dirección de viento para la estación Los Maitenes período 2018. Del panel superior se observa el comportamiento modelado. Durante las primeras horas de la madrugada presenta una marcada componente Sur, la que a comienzos de la mañana pasa a una componente Suroeste, la cual volvería a una componente Sur durante la tarde. Los datos observados presentan durante las primeras horas de la madrugada una componente Este, la cual rota hacia una componente Oeste durante las primera horas del día, esta se mantiene durante la tarde volviendo al Este a primeras horas de la noche. En el tope del panel inferior se presenta la frecuencia de Calmas para cada hora.

Figura 9-13 Ciclo diario de dirección de viento Los Maitenes 2018, panel superior modelada y panel inferior observada. Histograma de frecuencias en base 1.



Fuente: Elaboración propia, utilizando Python – matplotlib

9.3.4.4 Altura capa mezcla

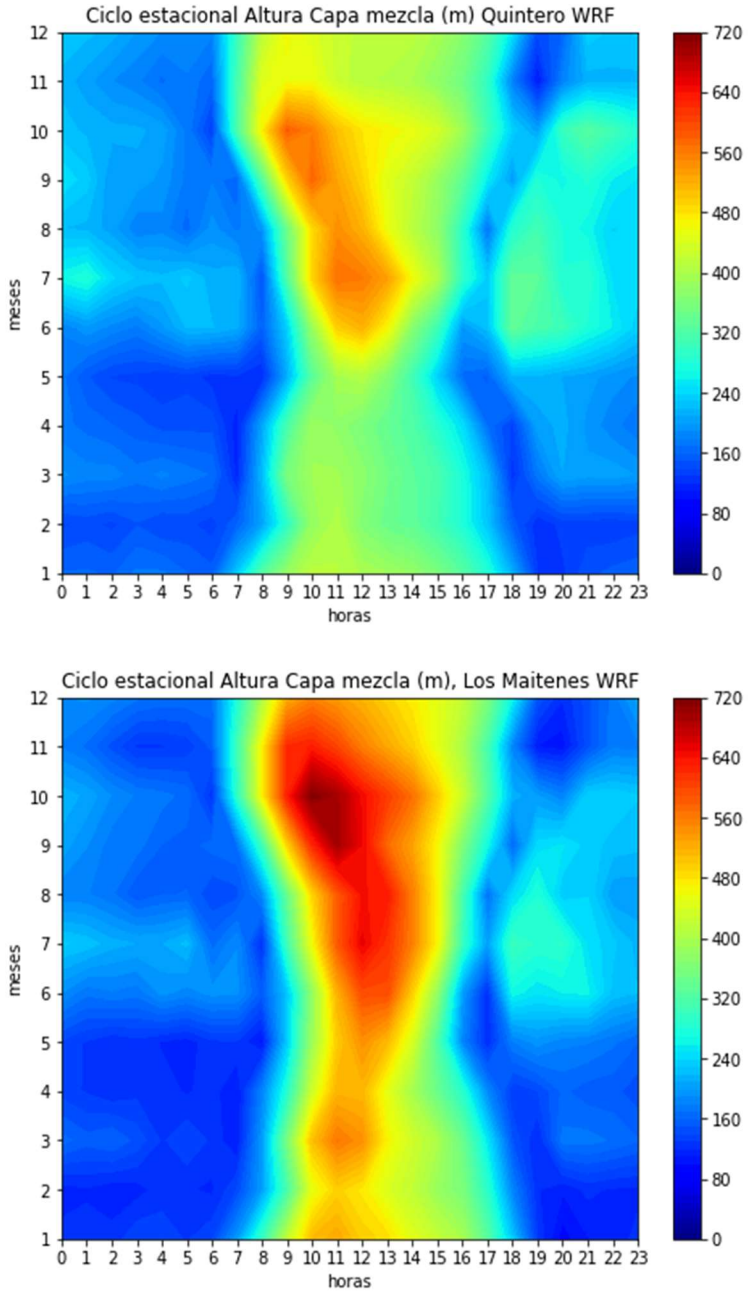
La Figura 9-14 presenta el ciclo estacional de Altura de capa de mezcla, modelada con WRF para el período 2018. El análisis es del tipo cualitativo pues no existen datos locales de esta variable. Se utilizan como referencia los datos de radiosonda Santo Domingo, pero no se tiene información con frecuencia suficiente para poder caracterizar un perfil diario, lo que refuerza la recomendación contar con un perfilador vertical que entregue información de la altura de la capa de mezcla para la zona.

Se observa para la estación Quintero, que las mayores alturas se presentan durante los meses de septiembre-octubre entre las 10 y las 12 horas, y para los meses de junio a agosto entre las 11 y las 13 horas.

Se observa para la estación Los Maitenes que los máximos de altura se dan en los meses de septiembre-octubre entre las 10 y las 12 horas.

Se observa que durante los meses de verano el aumento en la altura de la capa de mezcla comienza más temprano, entre 8 y 9 horas y su descenso aproximadamente a las 18 horas, mientras que para los meses de invierno el ciclo es más corto, comenzando a incrementarse entre las 9-10 horas y su descenso entre las 16-17 horas. Este fenómeno se explica por la forzante radiativa, presentándose en los meses de verano mayor cantidad de horas de sol.

Figura 9-14Ciclo estacional de Altura de capa de mezcla modelada 2018, panel superior Estación Quintero, panel inferior estación Los Maitenes.



Fuente: Elaboración propia, utilizando Python – matplotlib

9.3.5 Análisis de Resultados del modelo meteorológico

La Tabla 9-5 presenta los promedios, medianas, mínimos, máximos, percentiles 5, 95 y porcentajes de calmas para la magnitud del viento, observadas y modeladas con WRF en las estaciones Concón, Quintero y Los Maitenes. El modelo estima magnitudes de viento mayores a las observadas, tanto para el caso de los promedios como para las medianas. La estación Los Maitenes presenta la mayor diferencia para el promedio y Quintero la menor. Por otra parte, el modelo estima menores frecuencias de condiciones de calma (vientos menores a 0,27 m/s) que los registros de las estaciones monitoras.

Tabla 9-5 Estadígrafos de velocidad del viento (VV) para las estaciones Concón, Quintero y Los Maitenes

Estadígrafos	**Magnitud del viento m/s**					
	CON OBS VV	**QUI OBS VV**	**LMA OBS VV**	**CON WRF VV**	**QUI WRF VV**	**LMAWRF VV**
Datos	8633	8734	8578	8760	8760	8760
Promedio	1.7	2.2	0.9	3.9	4.2	3.7
Mediana	1.5	1.8	0.7	3.7	4.0	3.4
Mínimo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Máximo	9.5	9.9	3.8	12.7	13.8	13.2
Percentil 5	0.2	0.3	0.1	0.7	0.8	0.6
Percentil 95	4.3	5.7	2.4	8.0	8.9	8.1
% calmas	16.29%	4.87%	16.37%	1.31%	1.12%	1.71%

Fuente: Elaboración Propia

La Tabla 9-6 presenta la Evaluación de desempeño del modelo para magnitud del viento en las estaciones Concón, Quintero y Los Maitenes. Se observa que la estación Quintero presenta el menor sesgo y el menor error cuadrático medio de las tres estaciones. Respecto del sesgo fraccional, el modelo se acerca bastante a 0 (condición ideal).

Tabla 9-6 Evaluación de desempeño del modelo para la variable magnitud del viento en las estaciones Concón, Quintero y Los Maitenes

Estadígrafo	**VV CON**	**VV QUI**	**VV LMA**
Sesgo medio	2.20	2.04	2.73
Error cuadrático medio	2.91	2.81	3.38
Sesgo fraccional	0.000090	0.000073	0.000139

Fuente: Elaboración Propia

El modelo logra representar el ciclo diario y estacional de magnitud del viento en cuanto a forma, con vientos de mayor magnitud durante el día asociados a un mayor calentamiento, y vientos más débiles durante la noche. Existe una gran sobreestimación de las magnitudes en las 3 estaciones siendo la de mayor sobreestimación en Los Maitenes. Al comparar el comportamiento de las magnitudes con los gráficos de ciclo estacional de temperaturas de la Figura 9-10, se observa que esta sobrestimación no sería asociable a diferencias entre las temperaturas modelas y observadas, puesto que no se aprecian diferencias significativas entre éstas, excepto durante los meses fríos en que el modelo tiende a sobrestimar la temperatura durante el período nocturno.

En cuanto a la dirección del viento, el emplazamiento de la zona del ejercicio genera un ciclo diario de dirección de viento definido, con una componente Oeste durante el período diurno y Este durante el período nocturno, comportamiento que está vinculado principalmente a la forzante

radiativa que genera el proceso de calentamiento y enfriamiento del continente respecto del océano, generando las brisas mar-tierra durante el día, y en el período nocturno tierra-mar. Debido a las brechas encontradas en el análisis de los resultados asociadas a magnitud y dirección del viento, se realizó una revisión de modelaciones realizadas con WRF en la zona de estudio durante el período 2018[111]. De esta revisión se observa que la componente nocturna de dirección del viento es un tema aún no resuelto. Pese a que se utilizaron distintos esquemas de parametrización para configurar WRF por otros especialistas, tampoco lograron representar la componente Este nocturna en las estaciones más cercanas a la costa. Se infiere que esta componente es difícil de interpretar por el modelo debido a la baja magnitud del viento nocturno, no permitiendo que el modelo capture bien la dirección en este período. En los estudios revisados las magnitudes, también son sobrestimadas, en particular en la Estación Quintero.

9.3.5.1 Análisis de incertidumbre y factor de ajuste magnitud del viento

Para compensar el amplio sesgo de magnitud se estima un factor de corrección el que será aplicado a las concentraciones modeladas con CALPUFF. Este ajuste se sustenta en la relación que existe entre la mediana de la magnitud del viento anual y las concentraciones modeladas, el factor para cada una de las estaciones se presenta en la Tabla 9-7.

Tabla 9-7 Factor de ajuste de magnitud del viento

Estadígrafos	Magnitud del viento m/s					
	CON OBS VV	QUI OBS VV	LMA OBS VV	CON WRF VV	QUI WRF VV	LMAWRF VV
Mediana	1.5	1.8	0.7	3.7	4	3.4
Factor ajuste				2.47	2.22	4.86

Fuente: Elaboración Propia

9.3.6 Análisis y Configuración del modelo WRF Ejercicio 2

Debido a las brechas señaladas en cuanto a dirección y magnitud de viento, se realizó un segundo ejercicio de modelación utilizando la misma parametrización, pero con un factor de anidamiento de 4 dominios anidados y 47 niveles verticales de altura. Esta configuración permite un paso más estable de las condiciones de borde entre los dominios, pues se disminuyen las diferencias de resolución entre un anidamiento y otro. Esta configuración es altamente demandante en cuanto a recursos computacionales por lo que solo se modeló desde enero a marzo 2018, con la finalidad de identificar si existían cambios significativos en cuanto a las variables de viento.

Los resultados mostraron que no existían cambios significativos en cuanto a los ciclos diarios de magnitud y dirección de viento. Debido a esto los resultados principales solo se presentarán en Anexo modelo WRF Ejercicio 2.

[111]Informe de observaciones y modelación meteorológica, Sector Quintero – Puchuncaví, Ingeniería y Geofísica Limitada, 2019.

9.4 Modelación de calidad del aire

9.4.1 Justificación modelo calidad del aire

De acuerdo con lo establecido en la Guía para el uso de Modelos de Calidad del Aire en el SEIA, la selección del modelo de Calidad del Aire se basa en la topografía compleja del área donde se emplaza el proyecto y al alcance de las emisiones. Por esta razón, el modelo utilizado fue un modelo tipo "Puff" como lo es CALPUFF.

9.4.2 Descripción del modelo calidad del aire

El modelo CALPUFF utilizado en este ejercicio es un sistema avanzado de modelación meteorológica y de calidad del aire en estado no estacionario desarrollado por científicos de Exponent. Es mantenido por los desarrolladores de modelo y distribuido por Exponent. El modelo es recomendado por el Ministerio del Medio Ambiente de Chile en su guía de Modelos de Calidad del Aire del Servicio de Evaluación Ambiental, para evaluar el transporte de contaminantes a más de 5 km y sus impactos en diferentes receptores. El sistema de modelación consiste en tres componentes principales CALMET, CALPUFF y CALPOST, y un conjunto de programas de pre y post procesamiento.

- CALMET consiste en un modelo meteorológico de diagnóstico, que genera los campos de viento y temperatura para la grilla del dominio tridimensional del modelo, que incluye el análisis y el proceso parametrizado de flujos de pendiente, efectos cinemáticos del terreno, efectos de bloqueo del terreno y minimización de la divergencia entre otros. También asocia los campos bidimensionales como la altura de mezclado, las características de la superficie.

- CALPUFF es un modelo no estacionario Lagrangiano Gaussiano que incluye módulos para trabajar con los efectos del terreno complejo, el transporte sobre medios acuíferos, los efectos de interacción con la costa, la depositación seca y húmeda y las trasformaciones químicas simples. Realiza el transporte de los PUFFs de contaminantes generados desde las fuentes de emisión modeladas, simulando los procesos de dispersión y transformación a través de las trayectorias. Genera los archivos de concentraciones y flujos de depositación horarios en cada uno de los receptores evaluados en el modelo.

- CALPOST procesa los archivos de salida de CALPUFF, presentando los resultados en los formatos en las bases temporales necesarias como concentraciones y flujos de depositación horarias, diarias o anuales.

Además de estos componentes, hay muchos otros procesadores que se pueden usar para preparar data geofísica (uso de suelo y terreno) en muchos formatos estándares, datos meteorológicos (de superficie y de altura), e interfaces con otros modelos como los modelos ETA/NAM y RUC del National Center for Environmental Prediction (NCEP), WRF y el modelo RAMS. Puede utilizarse

para modelar dispersión en terrenos complejos y permite la configuración de una serie de fuentes de emisión, además de considerar las características complejas de la geomorfología sobre el cual se presenta la dispersión, e incluye la posibilidad de modelar la dispersión de contaminantes primarios y secundarios, obteniendo resultados confiables para distancias de hasta 100 km. Calpuff realiza sus cálculos tomando en cuenta la geografía del terreno así como el tipo de uso de suelo sobre el cual se hace la modelación. También incluye BPIP, modelo aprobado por la USEPA para determinar el efecto que pueden tener los edificios cercanos sobre la dispersión de las emisiones. Dentro de las capacidades del sistema de modelación se destacan los siguientes puntos:

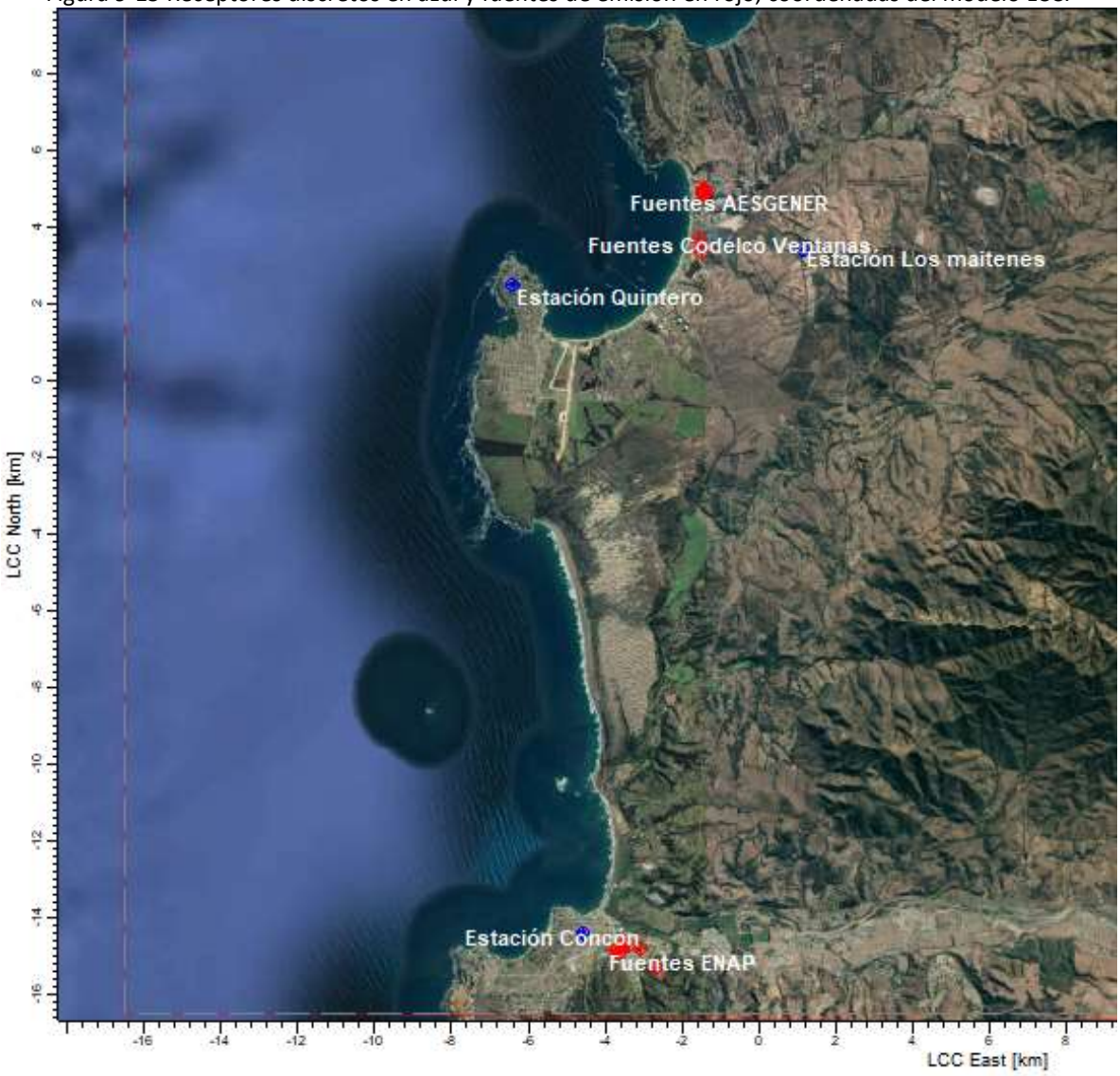
- Permite modelar transporte de largo alcance (hasta 200 Km).
- Simula procesos meteorológicos complejos tales como: velocidades de vientos muy bajas, estancamiento, fumigación y recirculación.
- Es capaz de incorporar efectos debidos a la proximidad al borde costero o a causa de topografía compleja.
- Modela contaminantes de forma simultánea, fuentes de diverso tipo y que modifican su nivel de actividad a lo largo del tiempo.
- Permite diferenciar entre contaminantes inertes y aquellos que experimentan transformaciones de primer orden.

Es importante señalar que, siguiendo los lineamientos de la Guía para el Uso de Modelos de Calidad del Aire enel SEIA, no fue utilizado el modelo meteorológico CALMET. Por esta razón la meteorología modelada con WRF para el año 2018, fue procesada en MMIF v3.2 para ser ingresada al modelo de dispersión CALPUFF de manera directa.

9.4.2.1 Receptores discretos

Los receptores discretos, corresponden a las estaciones con medición de calidad del aire utilizadas. Las coordenadas de los receptores de interés se presentan en la Tabla 9-1 y en la Figura 9-15.

Figura 9-15 Receptores discretos en azul y fuentes de emisión en rojo, coordenadas del modelo LCC.

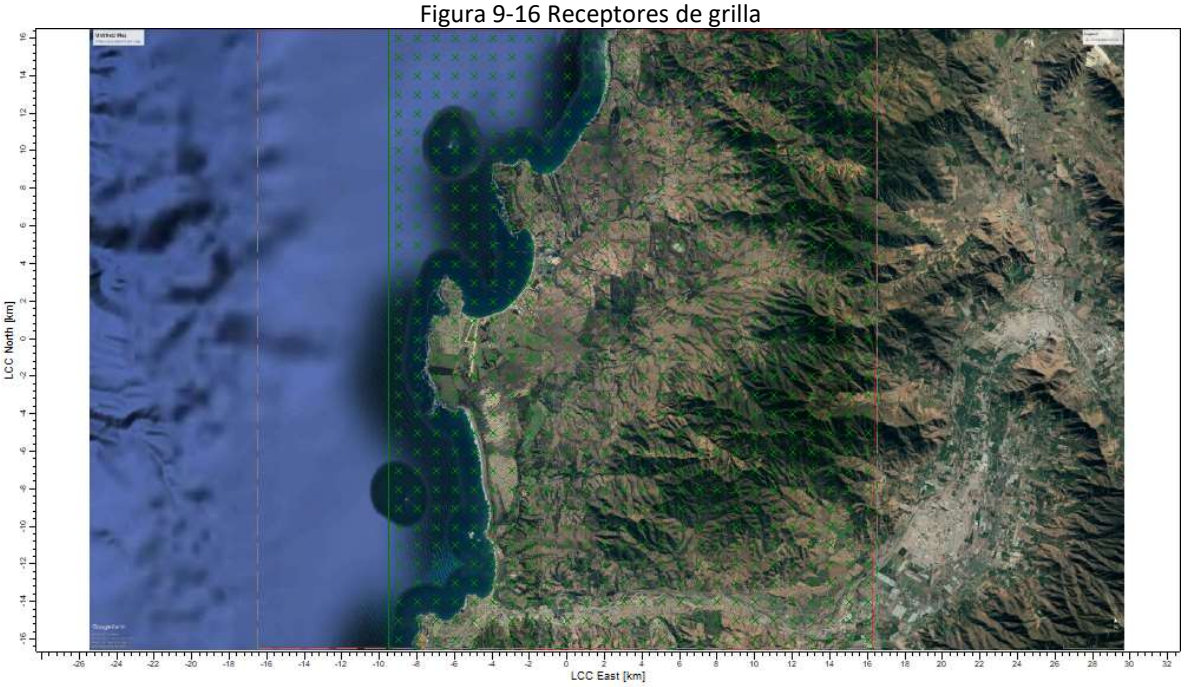


Fuente: Elaboración propia utilizando Google Earth

9.4.2.2 Receptores grilla

La Figura 9-16 presenta en verde los receptores de grilla utilizados en el modelo, y en rojo la grilla computacional, la grilla de receptores se definió utilizando la misma resolución que la grilla de modelación meteorológica de 1x1 km.

Figura 9-16 Receptores de grilla



Fuente: Elaboración propia utilizando Google Earth

9.5 Inventario de emisiones

Se entiende por inventario de emisiones al recuento de emisiones contaminantes liberadas a la atmósfera por un período de tiempo y en un lugar determinado. En referencia a este ejercicio de modelación se utilizó como información de base el Inventario de emisiones entregado por el mandante en el informe "Actualización de Inventario de Emisiones Atmosféricas, Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví", elaborado por el Ministerio del Medio Ambiente, División de Calidad del Aire, diciembre de 2018.

Debido a que la configuración y parametrización de las fuentes de emisión (altura de emisión, velocidad y temperatura de salida de los gases), no estaba presente en el inventario entregado, se complementó la información realizando un levantamiento y análisis de información disponible para la zona, tanto de estudios de emisiones como mediante las plataformas MMA y del Servicio de Evaluación Ambiental SEA en sus Estudios y/o Declaraciones de Impacto Ambiental, para los principales aportantes de emisiones.

Es importante mencionar que se encontraron brechas importantes al momento de definir las fracciones más finas del material particulado, en particular la de MP2.5, puesto que luego de la revisión de las emisiones declaradas en RETC DS 138 para 2018, no se presentan las emisiones de MP2.5 de las fuentes con mayor aporte de Material Particulado total.

Las fuentes de información revisadas fueron:

- "Estudio Diagnóstico Plan de Gestión Atmosférica – Región de Valparaíso, Construcción de un Inventario de Emisiones Regional", Inventario de Emisiones Preparado por Ambiosis: Publicado en diciembre del año 2011.
- "Evaluación del Impacto en la Calidad del Aire del Proyecto Central Nueva ERA", Estudio de impacto ambiental Proyecto Central Nueva ERA. Inventario de Emisiones Preparado por ENVIROMODELING, diciembre 2015
- Registro Único de Emisiones Atmosféricas. Declaración de Emisiones Atmosféricas DS 138, RETC 2018.
- "Estudio de dispersión atmosférica", Proyecto tratamiento de gases secundarios del CT CODELCO División Ventanas, Preparado por PROUST, febrero 2016.
- https://ppda.mma.gob.cl/valparaiso/ppda-concon-quintero-puchuncavi/Informe-respuesta-ORD-211-CODELCO.pdf.
- https://ppda.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/09/informe-emisiones-ENAP.pdf.

Se presenta la caracterización de las principales fuentes de emisión de SO_2 y MP2.5. Las emisiones de MP2.5 utilizadas fueron estimadas a partir de factores obtenidos de los estudios nombrados anteriormente.

Los principales parámetros utilizados para modelar las fuentes de emisión fueron:

- Altura de emisión
- Velocidad de salida de los gases
- Temperatura de salida de los gases
- Emisión de SO2 en ton/año
- Emisión de MP2.5 en ton/año

Las fuentes de emisión, su caracterización, coordenadas y emisiones para el período 2018, se presentan en la Tabla 9-8, su ubicación se presenta en la Figura 9-15.

Tabla 9-8 Características de las fuentes y tasas de emisión

Fuente emisión	Descripción	Descripción referencia	Código Fuentes DS 138	Tipo	Diámetro m	Altura m	Velocidad m/s	Temperatura K
Codelco Ventanas	Convertidor Teniente	Anexo D-2 Tratamiento gases secundarios CT	PC000006-4	fugitivas	11.3	12.0	1.4	373.2
	Horno Eléctrico		PS000066-5					
	Convertidor Pierce Smith 3		PC000009-9					
	Convertidor Pierce Smith 2		PC000008-0					
	Convertidor Pierce Smith 1		PC000007-2					
	Información insuficiente		PC000011-0					
			PC000010-2					
			PC000012-9					
			PC000013-7					
			PC000005-6					
	Chimenea		PC000015- 3	puntual	3.0	168.0	27.4	353.2
	Subtotal							
Eléctricas	Unidad 1	DS 138	GE000035-7	puntual	4.1	61.0	9.0	390.0
	Unidad 2		GE000036-5	puntual	4.9	61.6	13.0	396.0
	Campiche		GE000124-8	puntual	4.8	95.0	18.6	354.0
	Nueva Ventanas		GE000072-1	puntual	4.8	95.0	18.6	354.0
	Subtotal							

Fuente emisión	Descripción	Descripción referencia	Código Fuentes DS 138	Tipo	Diámetro m	Altura m	Velocidad m/s	Temperatura K
ENAP	Cracking catalítico	ENAP ORD N° 275	Información insuficiente	puntual	1.1	45.5	61.9	574.2
	Horno post combustión URA 1			puntual	0.9	46.0	6.8	829.7
	Horno post combustión URA 2			puntual	0.6	45.0	26.5	602.4
	Horno post combustión URA 3			puntual	0.6	48.0	26.5	563.3
	SAR			puntual	2.5	52	11.1	543.9
	Hornos			puntual	2.1	65	8.2	455
	Antorchas			puntual	0.8	42	0.5	639.2
	Caldera B-210	RES EX N° 2248	IN000649-5	puntual				
	Caldera B-220		IN000650-9	puntual				
	Caldera B-230		IN000651-7	puntual				
	Caldera B-240		IN001036-0	puntual				
	Caldera U-751		IN000652-5	puntual				
	Subtotal							
METSO MINERALS (CHILE) S A	Información insuficiente		IN000066-7	puntual	Sin información			
			IN000065-9	puntual				

Fuente emisión	Descripción	Descripción referencia	Código Fuentes DS 138	SO2 ton/año	MP ton/año	MP 10 ton/año	MP 2.5 ton/año	Referencia Factor MP2.5	Coordenadas UTM Datum WGS84 X	Y
Codelco Ventanas	Convertidor Teniente	Anexo D-2 Tratamiento gases secundarios CT	PC000006-4	9,685.46	15.14	9.92	6.25	Inventario Ambiosis Factor 0.63 MP2.5/MP10	6,377,500	267,000
	Horno Eléctrico		PS000066-5		35.05	27.99	17.63			
	Convertidor Pierce Smith 3		PC000009-9		5.05	3.97	2.50			
	Convertidor Pierce Smith 2		PC000008-0		5.05	3.97	2.50			
	Convertidor Pierce Smith 1		PC000007-2		5.05	3.97	2.50			
	Información insuficiente		PC000011-0		No se especifica en DS 138	20.16	12.70			
			PC000010-2			20.16	12.70			
			PC000012-9			20.17	12.71			
			PC000013-7			20.19	12.72			
			PC000005-6		88.63	42.07	26.50			
	Chimenea		PC000015-3	413.39	Información insuficiente				6,372,051	267,422
	Subtotal			**10,098.86**	**153.96**	**172.56**	**108.71**			
Eléctricas	Unidad 1	DS 138	GE000035-7	465.82	13.49	No aplica	5.53	Inventario Ambiosis Factor 0.41 MP2.5/MP	6,373,539	267,418
	Unidad 2		GE000036-5	1,497.29	64.08		26.27		6,373,613	267,414
	Campiche		GE000124-8	1,907.89	52.56		21.55		6,373,428	267,720
	Nueva Ventanas		GE000072-1	2,276.05	108.97		44.68		6,373,430	267,716
	Subtotal			**6,147.04**	**239.10**		**98.03**			

Fuente emisión	Descripción	Descripción referencia	Código Fuentes DS 138	SO2 ton/año	MP ton/año	MP 10 ton/año	MP 2.5 ton/año	Referencia Factor MP2.5	Coordenadas UTM Datum WGS84 X	Y
ENAP	Cracking catalítico	ENAP ORD N° 275	Información insuficiente	725.00	691.00		691.00	Inventario Ambiosis Factor 1.00 MP2.5/MP	6,353,984	265,756
	Horno post combustión URA 1			364.92	0.23		0.23		6,353,838	265,651
	Horno post combustión URA 2			384.27	0.23		0.23		6,353,828	265,687
	Horno post combustión URA 3			360.10	0.23		0.23		6,353,855	265,600
	SAR			23.20	0.20		0.20		6,354,000	265,926
	Hornos			62.40	19.70		19.70		6,353,929	266,263
	Antorchas			3.80	-		-	DS 138	6,353,456	266,639
	Caldera B-210	RES EX N° 2248	IN000649-5	4.39	No se especifica en DS 138		1.20		6,354,307	265,599
	Caldera B-220		IN000650-9	6.56			3.58		6,354,307	265,599
	Caldera B-230		IN000651-7	9.63			3.63		6,354,307	265,599
	Caldera B-240		IN001036-0	8.29			2.26		6,354,307	265,599
	Caldera U-751		IN000652-5	7.97			2.42		6,354,307	265,599
ENAP	**Subtotal**			**1,923.69**	**711.60**		**724.69**			
METSO MINERALS (CHILE) S A	Sin información	IN000066-7		6.05	No se especifica en DS 138		No se especifica en DS 138			
		IN000065-9		8.82						
Total				**18,184.45**	**1,104.66**		**931.44**			

Fuente: Elaboración propia, en base a la información de DS 138 y SEA

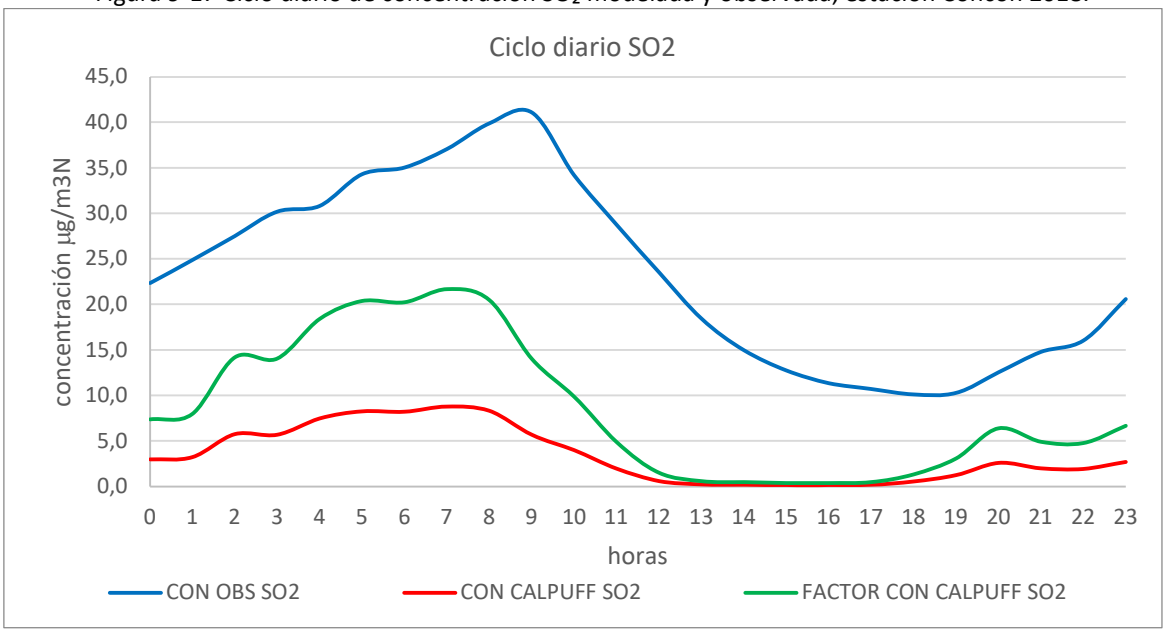
9.5.1 Resultados de modelación de calidad del aire

Se presentan en esta sección las concentraciones modeladas con la meteorología del modelo WRF, las principales fuentes de emisión del período 2018 y el modelo de dispersión CALPUFF para las estaciones Concón, Quintero y Los Maitenes.

Es importante mencionar que las emisiones utilizadas en este ejercicio (en base a la información recopilada), se estimaron en base temporal de 1 año. La tasa de emisión en ton/año deja fuera la variabilidad diaria y estacional de las emisiones, además de los niveles de actividad variables asociados a los niveles productivos de las distintas fuentes, los que serían de gran importancia, al enfocar la modelación hacia un pronóstico operacional.

La Figura 9-17 presenta el ciclo diario de concentración de SO_2 modelada en rojo y observada en azul para el punto de grilla que contiene a la estación Concón para el año 2018. Se observa que ambas curvas describen un comportamiento similar en su ciclo diario, con concentraciones en aumento durante el período nocturno y una disminución al comenzar el día. La concentración observada en azul es mayor que la modelada en rojo. Entre las 09 y 10 horas se registra el máximo observado y alcanza un sesgo de más de 30 µg/m^{3}N, el que disminuye durante las horas de la tarde. La curva en verde presenta las concentraciones modeladas corregidas por el factor de magnitud de viento, el sesgo respecto del máximo observado es menor a 20 µg/m^{3}N.

Figura 9-17 Ciclo diario de concentración SO_2 modelada y observada, estación Concón 2018.

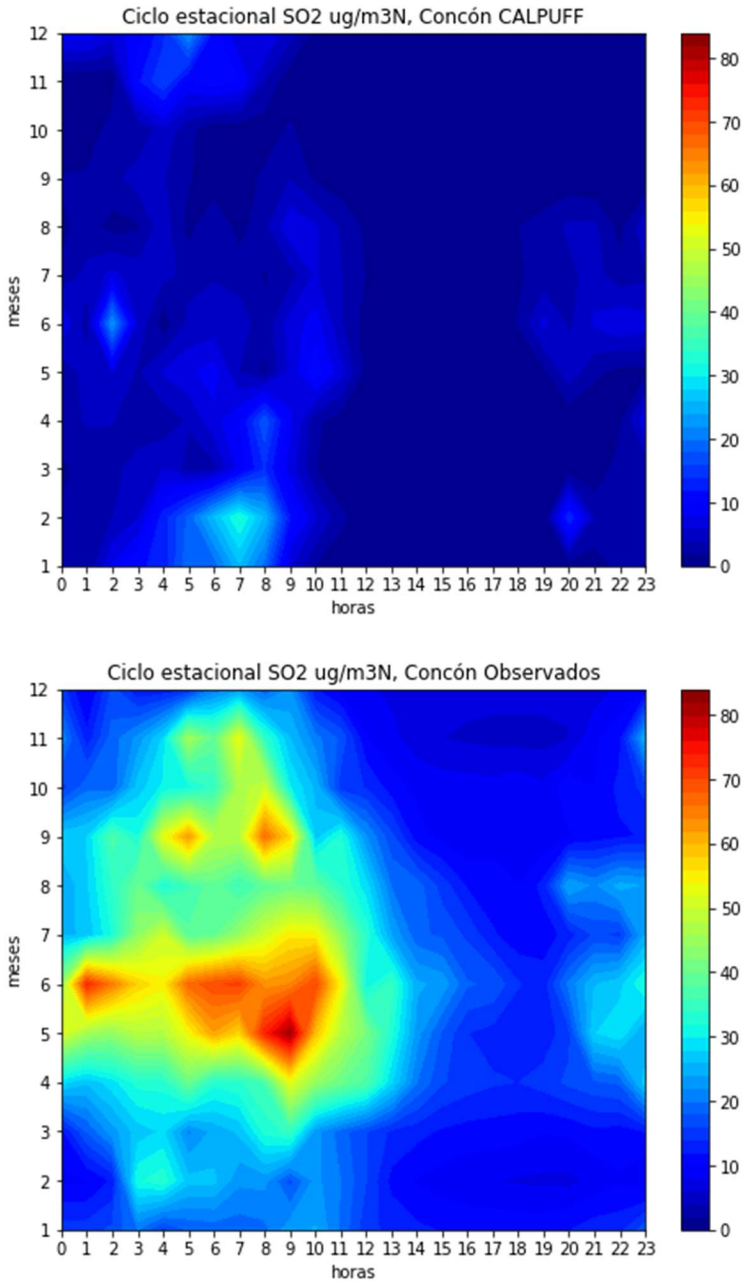


Fuente: Elaboración propia, con datos de las estaciones de monitoreo y modelados con CALPUFF

La Figura 9-18 presenta el ciclo estacional de concentración de SO_2 en la estación Concón, para el período 2018. En el panel superior que presenta las concentraciones modeladas se observa un promedio máximo en los meses cálidos durante las primeras horas de la mañana por sobre los 30

µg/m^{3}N, que coinciden con las velocidades más bajas modeladas. El panel inferior presenta las concentraciones observadas, en donde las concentraciones promedio más altas se dan durante la madrugada y las primeras horas de la mañana, principalmente en los meses de mayo y junio, alcanzando máximos promedio mensual de 76 µg/m^{3}N a comienzos de la mañana.

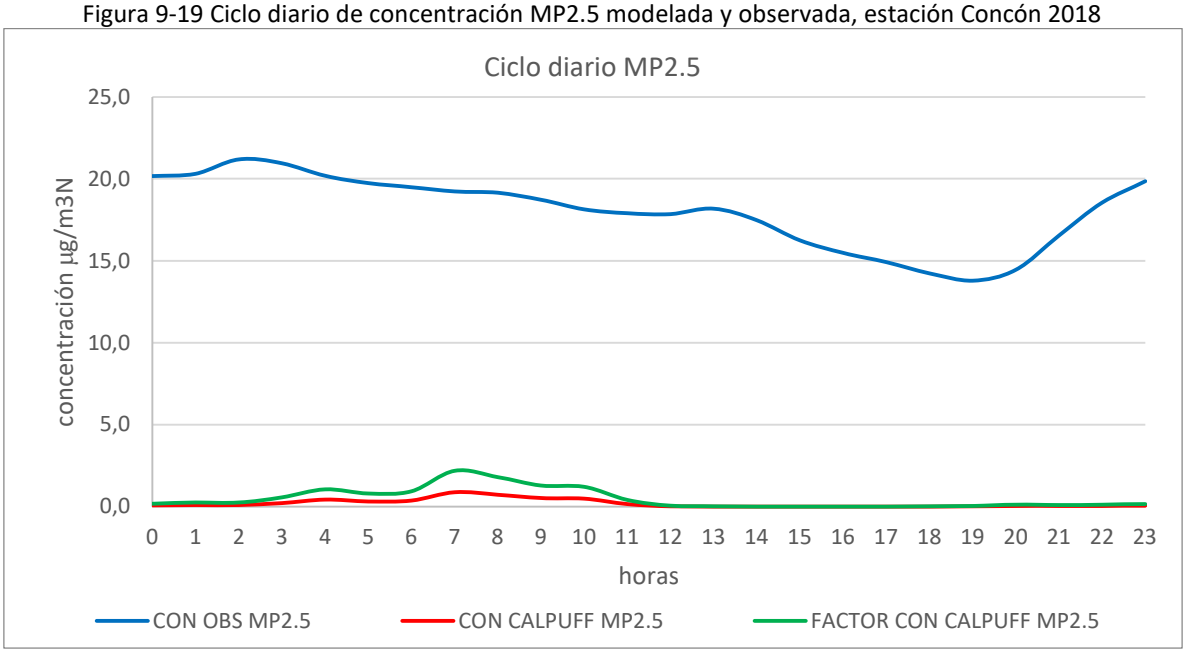
Figura 9-18 Ciclo estacional de concentración de SO_2 en la estación Concón, 2018, panel superior datos modelados y panel inferior datos observados.



Fuente: Elaboración propia, utilizando Python – matplotlib

La Figura 9-19 presenta el ciclo diario de concentración de MP2.5 modelada y observada para el punto de grilla que contiene a la estación Concón. Se observa que la contribución del MP2.5 primario proveniente desde las fuentes de emisión modeladas es demasiado bajo en comparación a las observadas.

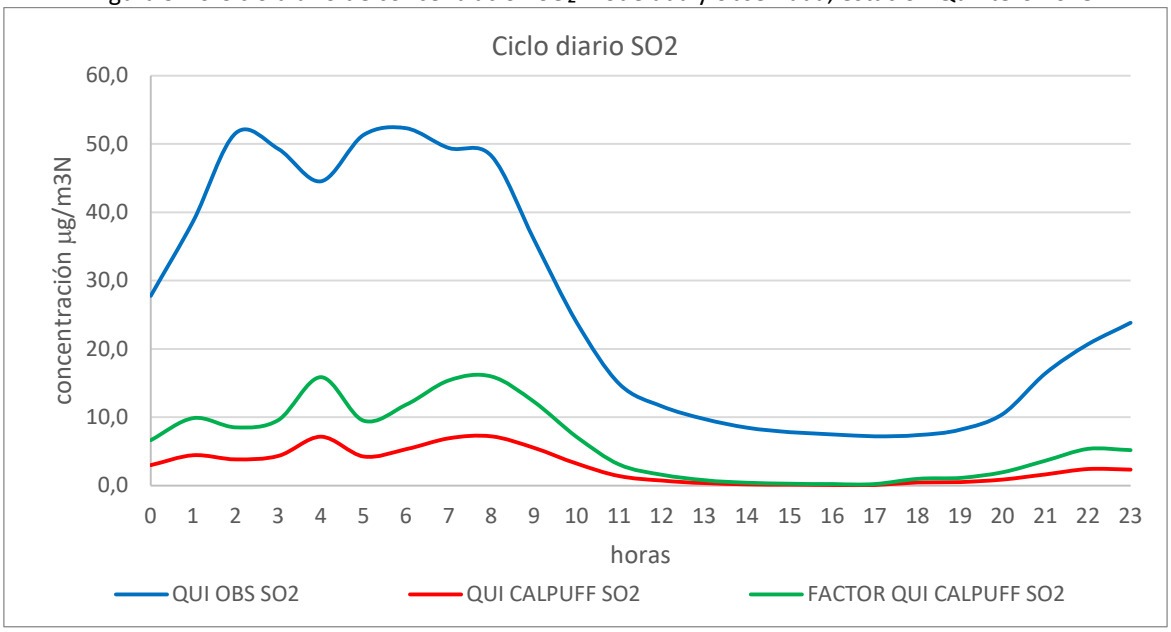
Figura 9-19 Ciclo diario de concentración MP2.5 modelada y observada, estación Concón 2018



Fuente: Elaboración propia, con datos de las estaciones de monitoreo y modelados con CALPUFF

La Figura 9-20 presenta el ciclo diario de concentración de SO_2 modelada en rojo y observada en azul, para el punto de grilla que contiene a la estación Quintero. Se observa que ambas curvas describen un comportamiento similar en su ciclo diario, con mayores concentraciones en el período nocturno y una disminución de éstas al comenzar la mañana. La concentración observada en azul es mayor que la modelada en rojo, especialmente en las horas de la madrugada, en que alcanza un sesgo de 50 $\mu g/m^3N$, el que disminuye durante las horas de la tarde. La curva en verde presenta las concentraciones modeladas corregidas por el factor de velocidad de viento, el sesgo respecto del máximo observado es de 40 $\mu g/m^3N$.

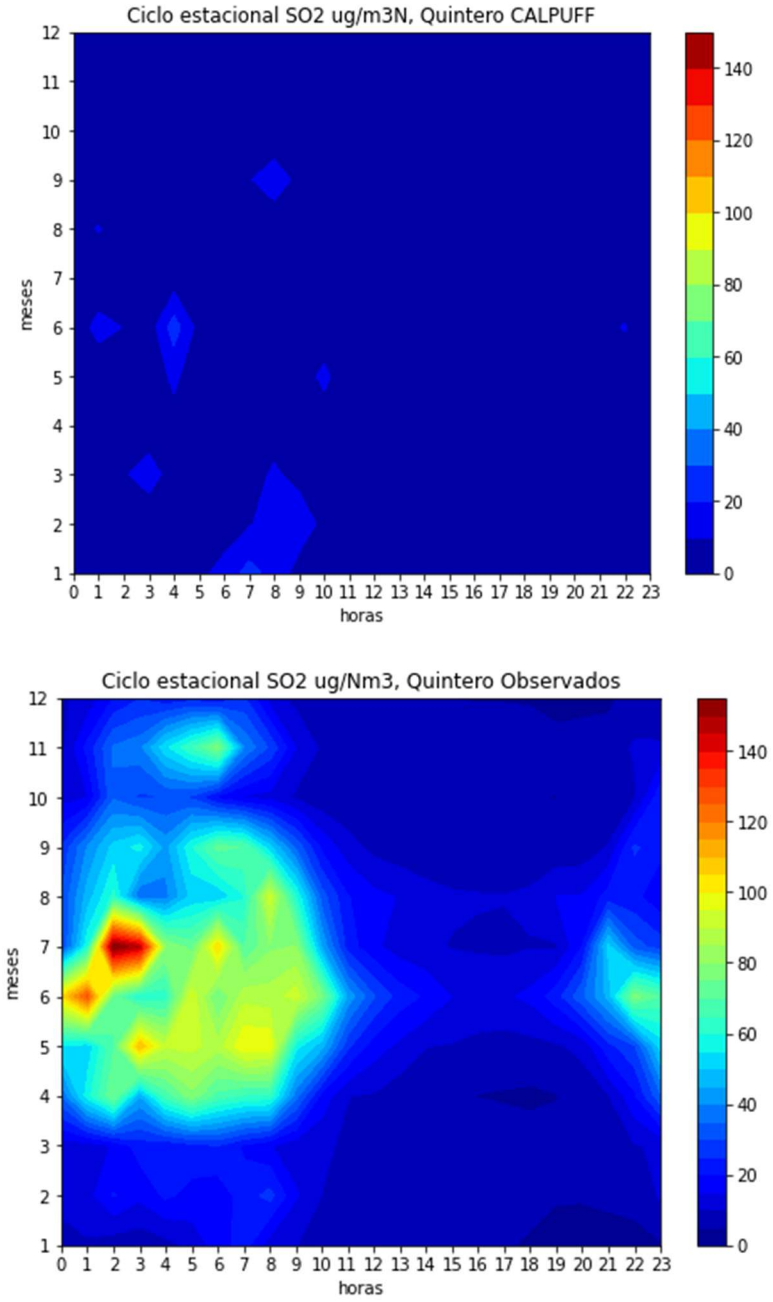
Figura 9-20 Ciclo diario de concentración SO_2 modelada y observada, estación Quintero 2018



Fuente: Elaboración propia, con datos de las estaciones de monitoreo y modelados con CALPUFF

La Figura 9-21 presenta el Ciclo estacional de concentración de SO_2 en la estación Quintero, para el período 2018, en el panel superior se presentan las concentraciones modeladas. Se observa un promedio máximo durante las primeras horas de la mañana en los meses cálidos y durante la madrugada de junio de 22$\mu g/m^3N$. El panel inferior presenta las concentraciones observadas, en donde se aprecian concentraciones promedio más altas durante la madrugada y máximo promedio de 142$\mu g/m^3N$ durante la madrugada en los meses de junio y julio.

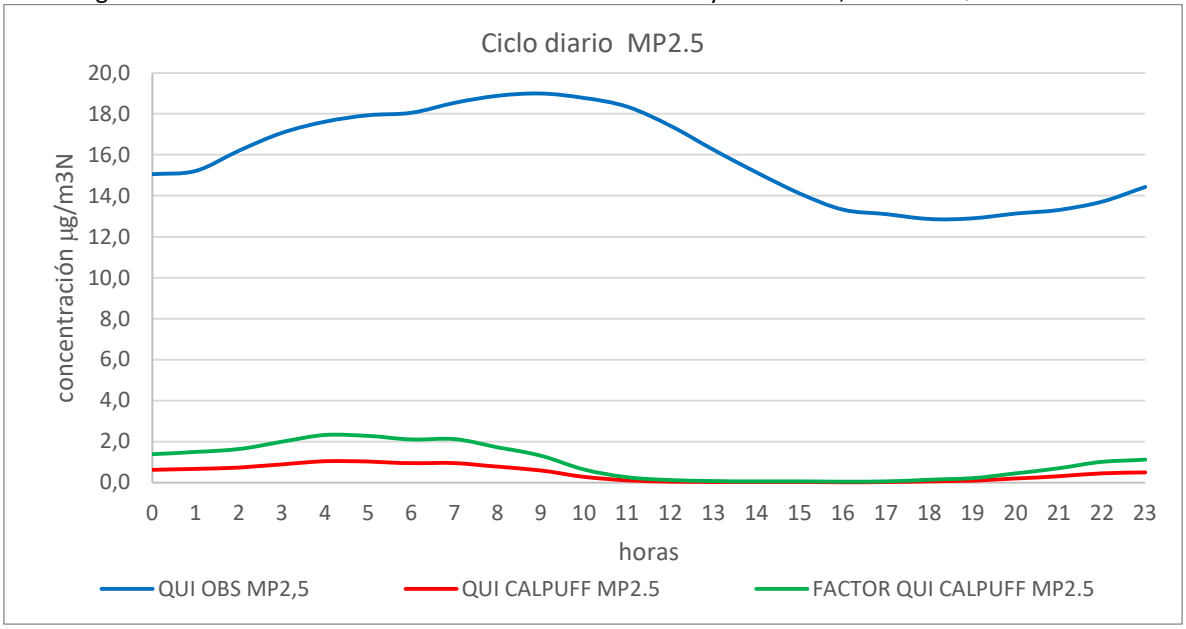
Figura 9-21 Ciclo estacional de concentración de SO_2 en la estación Concón, 2018, panel superior datos modelados y panel inferior datos observados.



Fuente: Elaboración propia, utilizando Python – matplotlib

La Figura 9-22 presenta el ciclo diario de concentración de MP2.5 horaria modelada y observada para el punto de grilla que contiene a la estación Quintero. Se observa que, aunque tiende a representar un ciclo diurno y nocturno, la contribución del MP2.5 primario proveniente desde las fuentes de emisión modeladas es demasiado bajo en comparación a las observadas.

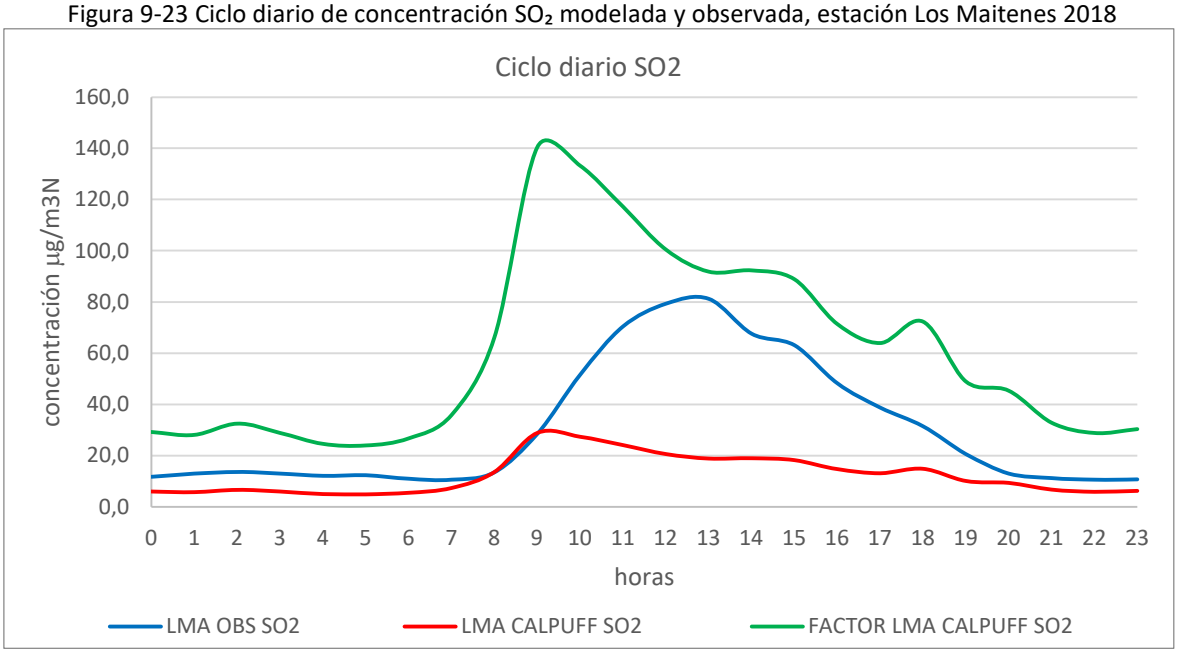
Figura 9-22Ciclo diario de concentración MP2.5 modelada y observada, estación Quintero 2018



Fuente: Elaboración propia, con datos de las estaciones de monitoreo y modelados con CALPUFF

La Figura 9-23 presenta el ciclo diario de concentración de SO_2 modelada en rojo y observada en azul para el punto de grilla que contiene a la estación Los Maitenes. Se observa que ambas curvas describen un comportamiento similar en su ciclo diario, con bajas concentraciones nocturnas, un ascenso marcado en las primeras horas de la mañana y una disminución durante las horas de la tarde. La concentración observada en azul es mayor que la modelada en rojo, especialmente durante el mediodía en que se alcanza el máximo observado y un sesgo de 60 μg/m^{3}N, el que luego disminuye durante las horas de la tarde. La Curva en verde presenta las concentraciones modeladas corregidas por el factor de velocidad de viento, se observa que en este caso el modelo sobrestima las concentraciones modeladas. El mayor sesgo se presenta en el máximo modelado a las 9 de la mañana y es de 100 μg/m^{3}N.

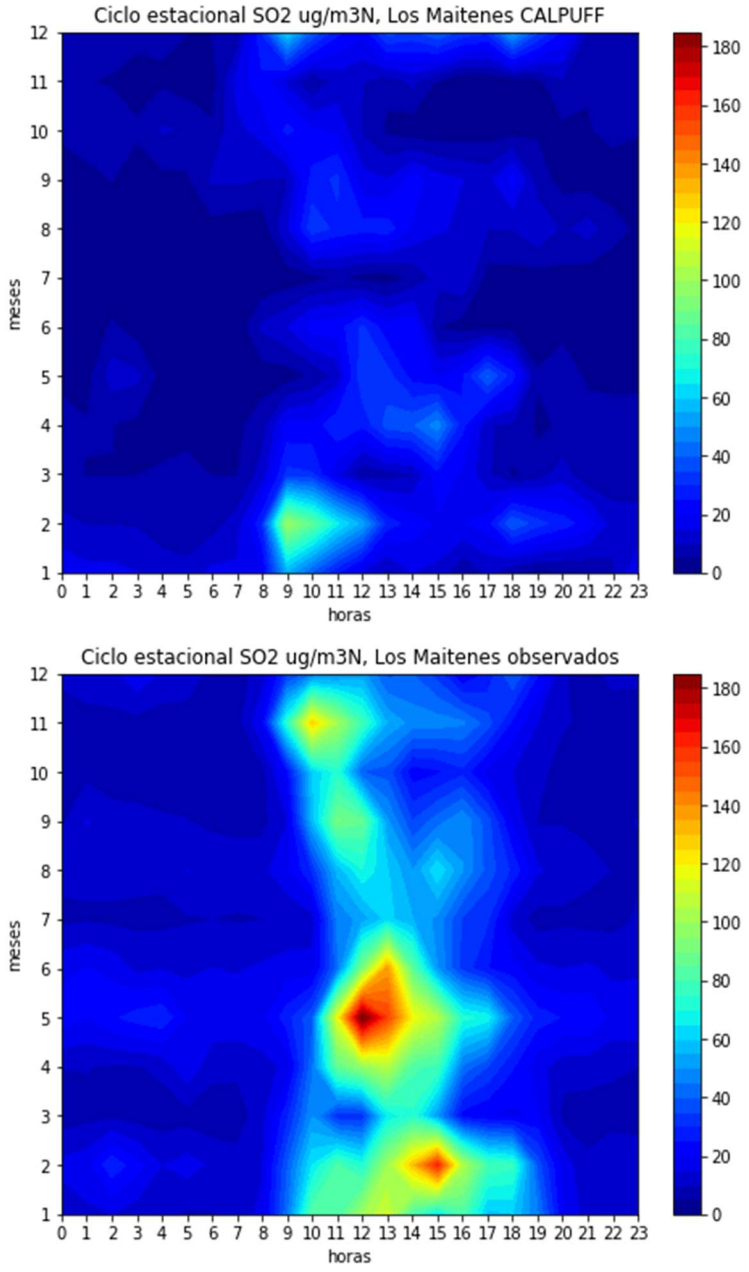
Figura 9-23 Ciclo diario de concentración SO_2 modelada y observada, estación Los Maitenes 2018



Fuente: Elaboración propia, con datos de las estaciones de monitoreo y modelados con CALPUFF

La Figura 9-24 presenta el Ciclo estacional de concentración de SO_2 en la estación Los Maitenes, para el período 2018. En el panel superior se presentan las concentraciones modeladas, en donde se aprecian concentraciones más altas durante el día en todos los meses y un máximo en las primeras horas de la mañana de los meses cálidos de 96 μg/m^{3}N. El panel inferior presenta las concentraciones observadas, en donde se aprecian concentraciones más altas durante el día en los meses cálidos, con el máximo promedio de 174 μg/m^{3}N en el mes de mayo.

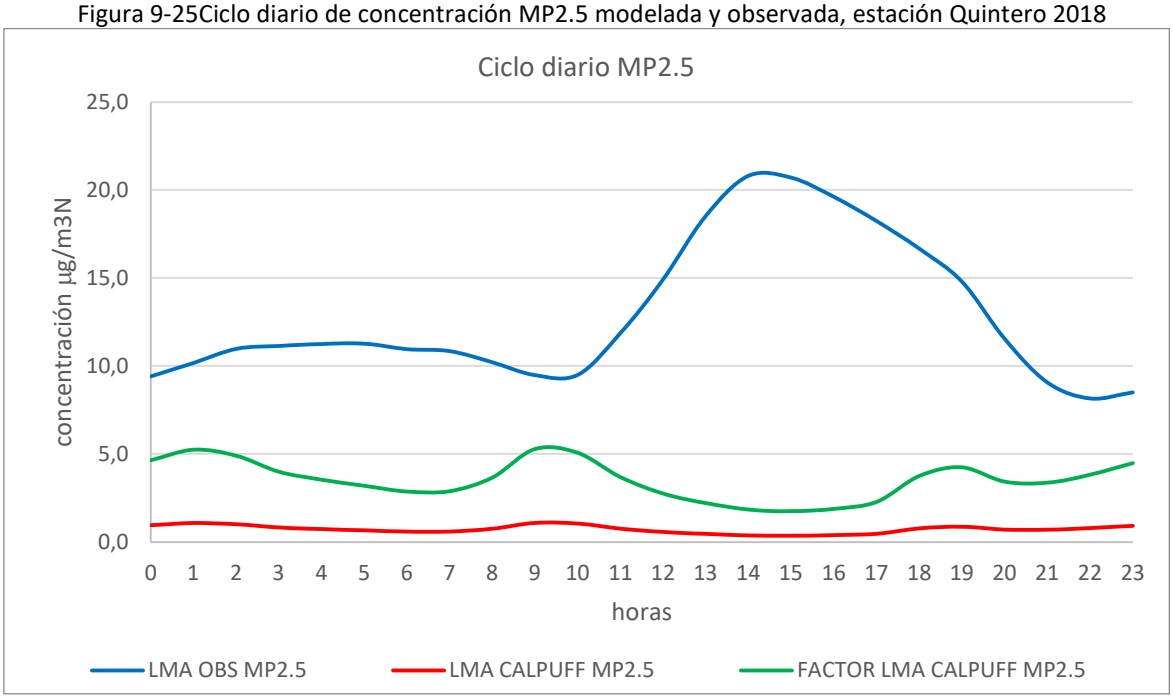
Figura 9-24 Ciclo estacional de concentración de SO_2 en la estación Los Maitenes, 2018, panel superior datos modelados y panel inferior datos observados.



Fuente: Elaboración propia, utilizando Python – matplotlib

La Figura 9-25 presenta el ciclo diario de concentración de MP2.5 modelada y observada para el punto de grilla que contiene a la estación Quintero. Se observa que la contribución del MP2.5 primario proveniente desde las fuentes de emisión modeladas es baja en comparación a los observados y el modelo no logra representar el ciclo diario de concentraciones.

Figura 9-25Ciclo diario de concentración MP2.5 modelada y observada, estación Quintero 2018



Fuente: Elaboración propia, con datos de las estaciones de monitoreo y modelados con CALPUFF

La Tabla 9-9 presenta los promedios, medianas, mínimos, máximos, percentiles 5 y 95 para la concentración de SO_2 µg/m^{3}N, observadas y modeladas con WRF en las estaciones Concón, Quintero y Los Maitenes. El modelo estima concentraciones menores a las observadas, tanto para el caso de los promedios como para las medianas, las que son muy cercanas a 0 para las modeladas. La estación Quintero presenta la mayor diferencia para el promedio, y la estación Los Maitenes la menor.

Tabla 9-9 Estadígrafos de concentraciones SO_2µg /m^{3}N para las estaciones Concón, Quintero y Los Maitenes

Estadísticos	Concentraciones SO_2µg/m^{3}Nmodeladas			Concentraciones SO_2µg/m^{3}N Observadas		
	CON	QUI	LMA	CON	QUI	LMA
Datos	8760	8760	8760	8635	8663	8667
Promedio	3.5	2.8	12.5	23.3	26.3	30.5
Mediana	0.0	0.0	0.4	13.5	8.9	9.0
Mínimo	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	1.8
Máximo	600.6	556.9	774.2	691.4	1793.7	1258.3
Percentil 5	0.0	0.0	0.0	4.7	2.1	4.5
Percentil 95	16.6	10.9	48.1	77.5	116.4	143.3

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 9-10 presenta la Evaluación de desempeño del modelo paraconcentraciones SO_2μg /m^3N en las estaciones Concón, Quintero y Los Maitenes. Se observa que la estación Los Maitenes presenta el menor sesgo, y Quintero el menor error cuadrático medio de las tres estaciones. Respecto del sesgo fraccional, el modelo se acerca bastante a 0 (condición ideal). Se observa que todos los sesgos son negativos por lo que el modelo subestima bastante las concentraciones en las 3 estaciones, siendo la de mayor subestimación la Estación Quintero.

Tabla 9-10 Evaluación de desempeño del modelo para concentraciones SO_2μg/m^3N en las estaciones Concón, Quintero y Los Maitenes

	SO_2 LMA	**SO_2 QUI**	**SO_2 CON**
SESGO MEDIO	-18.08	-23.48	-19.88
ERROR CAUDRATICO MEDIO	79.63	68.55	40.77
SESGO FRACCIONAL	-0.0001	-0.0002	-0.0002

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 9-11 presenta mediante una Tabla de contingencia, el desempeño del modelo en cuanto al número de días en que el máximo horario de SO_2 diario es mayor o igual a 350 μg /m^3N. Las concentraciones modeladas utilizadas en esta tabla fueron las corregidas por el factor de magnitud de viento.

Se observa que:

- Para la estación Concón el modelo no alertó 1 de los 4 días en que se generó una superación, mientras que generó 19 falsas alarmas.
- Para la estación Quintero el modelo alertó 4 de los 42 días en que se generó una superación, mientras que generó 9 falsas alarmas.
- En la estación Los Maitenes el modelo alertó 31 de los 32 días en que se generó una superación, mientras que generó 69 falsas alarmas.

Tabla 9-11 Tabal contingencia modelo

Muestra = 365		**Observado**	
		Supera	**No supera**
ConcónModelado	Supera	1	19
	No supera	4	341
QuinteroModelado	Supera	4	9
	No supera	42	310
Los MaitenesModelado	Supera	31	69
	No supera	32	233

9.6 Conclusiones

El modelo en cuanto a magnitudes de viento en Concón, Quintero y Los Maitenes sobrestima en todas las estaciones, presentando un sesgo positivo para la magnitud de 2.20, 2.04 y 2.73 m/s respectivamente. El error cuadrático medio promedio para las 3 estaciones es de 2.91, 2.81 y 3.38 m/s respectivamente.

El modelo logra representar en general la forma del ciclo diario y estacional de la magnitud del viento, de mayor magnitud durante el día y más débiles durante la noche, pero sobreestimados. Debido a las diferencias encontradas de magnitud del viento, se procedió a comparar su comportamiento con el de las temperaturas, variables estrechamente relacionadas, observándose que esta sobrestimación no sería atribuible a diferencias entre las temperaturas modeladas y observadas, puesto que no se vieron diferencias significativas entre éstas, excepto durante los meses fríos en que el modelo tiende a sobrestimar la temperatura durante el período nocturno. Una de las razones del sesgo de magnitud, se asocia a que, en las simulaciones con WRF en terreno complejo, no está bien parametrizada la influencia topográfica sobre el flujo de momentum. La parametrización de estos efectos no fue incluida, debido a no está implementada en el esquema de capa limite utilizado

En cuanto a la dirección del viento, la zona del ejercicio muestra un ciclo diario definido, con vientos de alguna componente Oeste durante el período diurno y con componente Este durante el período nocturno, comportamiento vinculado principalmente a las brisas mar-tierra, tierra-mar.

Debido a las brechas encontradas en el análisis de los resultados asociadas a magnitud y dirección del viento, se realizó una revisión de modelaciones realizadas con WRF en la zona de estudio durante el año 2018[112], concluyendo que la componente nocturna de dirección del viento es un desafío aún no resuelto, pues las magnitudes también fueron sobrestimadas, particularmente en la Estación Quintero.

Se estableció la configuración de los esquemas de parametrización para este ejercicio en base a la experiencia del consultor y a parametrizaciones utilizadas para pronósticos operacionales que se realizan actualmente con WRF en la zona. Sin embargo, es necesario que previo a la etapa de implementación de WRF (como herramienta dentro de un sistema de pronóstico operacional), se realice un estudio de sensibilidad, en el que se prueben distintos esquemas de parametrización, a fin de implementar el que logre un mejor ajuste respecto los variables meteorológicas en superficie (por el momento las únicas variables con las que se cuentan mediciones locales para realizar análisis comparativos).

Para el estudio de los esquemas de parametrización se sugiere seguir las recomendaciones de las publicaciones de JimyDudhia del NCAR/MMM. Este estudio se realiza en un período mucho mayor

[112]Informe de observaciones y modelación meteorológica, Sector Quintero – Puchuncaví, Ingeniería y Geofísica Limitada, 2019.

para realizar este ejercicio de modelación, por lo general 1 año. Además es importante indicar que este tipo de estudios son muy intensivos en el uso de recursos computacionales.

Debido a las brechas señaladas en cuanto a dirección y magnitud de viento, se realizó un segundo ejercicio de modelación utilizando la misma parametrización, pero con un factor de anidamiento de 4 dominios anidados y 47 niveles verticales de altura. Esta configuración permite un paso más estable de las condiciones de borde entre los dominios, pues se disminuyen las diferencias de resolución entre un anidamiento y otro, pero como es altamente demandante en cuanto a recursos computacionales, solo se modelaron los meses de enero a marzo del 2018. Los resultados mostraron que no existían diferencias significativas en cuanto a los ciclos diarios de magnitud y dirección de viento con esta nueva configuración.

Para compensar el sesgo de magnitud de viento se estimó un factor de corrección, el que fue aplicado a las concentraciones modeladas con CALPUFF. Este ajuste se sustenta en la relación que existe entre la mediana de la magnitud del viento anual y las concentraciones modeladas.

Respecto del inventario de emisiones para el PPDA recibido, se indica que se encontraron brechas importantes, puesto que éste presentaba emisiones a nivel general sin especificar, por ejemplo, las fracciones de material particulado fino de las distintas fuentes, por lo que fue necesario generar factores en base a las estimaciones presentadas en distintas declaraciones de impacto ambiental (DIA) de los principales aportantes de emisiones, las que no presentan coherencia suficiente entre ellas. Al respecto, se encontraron diferencias importantes entre las emisiones presentadas en el inventario del PDA y las que se registran en el DS 138. La caracterización de las distintas fuentes de emisión también se realizó a partir de las DIA.

La resolución temporal del inventario es anual, por lo que no es recomendable utilizarlo con fines de pronóstico operativo, pues las ton/año de contaminante no reflejan los distintos escenarios de producción a nivel de ciclo diario y estacional de las distintas fuentes. El nivel necesario para generar un inventario de emisiones a nivel de pronóstico operacional, sería objeto de un nuevo estudio en particular debido a las brechas encontradas, la incertidumbre de las emisiones aportadas por las fuentes fugitivas, y la falta de información para poder generar las emisiones que permitan utilizar un modelo con transformación química (WRF CHEM).

Cabe mencionar que como parte del ejercicio se efectuó el levantamiento de la información necesaria para implementar el inventario del PPDA en el modelo, pero desarrollar todas las actividades de estimación, actualización y compilación necesarias para el nivel de un sistema de pronóstico operacional, es una actividad que requeriría de al menos 1 año para realizarse.

Respecto de los resultados de las concentraciones de SO_2 modeladas, se observa que el modelo describe bien el comportamiento del ciclo diario de concentraciones, presentando en la estación Concón un aumento de concentraciones durante el período nocturno y una disminución de éstas durante las primeras horas de la mañana, pero presenta baja representación del aumento de concentraciones observada durante el período nocturno y las primeras horas del día en los meses fríos. La Estación Quintero también describe bien el comportamiento del ciclo diario de concentraciones, que es similar a Concón, pero también presenta una baja representación del

incremento de concentraciones observada durante el período nocturno y las primeras horas del día en los meses fríos. La Estación Los Maitenes también es bien representada en su ciclo diario de emisiones con un aumento de concentraciones durante las primeras horas de la mañana y la disminución de estas durante la tarde. La representación del aumento de concentraciones observada durante el período nocturno y las primeras horas del día en los meses fríos, presenta una mejor relación en el comportamiento estacional.

Se observó una brecha importante respecto de los valores de concentración de SO_2 modelados. Los valores estadísticos modelados con un sesgo medio negativo de -18.08, -23.48, y -19.88μg/m^3N en las estaciones Concón, Quintero y Los Maitenes respectivamente, y con un promedio de error cuadrático medio de 62 μg /m^3N, indica una gran subestimación. Esta subestimación se atribuye principalmente a la sobreestimación que realiza el modelo de la magnitud de viento.

Luego de compensar esta diferencia con el factor de ajuste de magnitud de viento se observa un comportamiento con una mejor captura del ciclo diario de concentraciones. Se utilizó, una tabla de contingencia, en la que se evaluó el número de días bien pronosticados, en los que el máximo horario de SO_2 diario fuera mayor o igual a 350 μg /m^3N. En la estación Concón el modelo no alertó 1 de los 4 días, mientras que generó 19 falsas alarmas. En la estación Quintero el modelo alertó 4 de los 42 días, mientras que generó 9 falsas alarmas. En la estación Los Maitenes el modelo alertó 31 de los 32 días, mientras que generó 69 falsas alarmas.

Si bien la estación Los Maitenes es la que presenta el mejor acierto, no implica necesariamente un mejor desempeño, puesto que luego del ajuste por factor de corrección de magnitud de viento, se sobrestimaron las concentraciones, lo que conlleva en una gran cantidad de falsos positivos o alarmas.

Respecto de los resultados obtenidos para MP2.5, la gran diferencia que se presenta en cuanto a las concentraciones modeladas y observadas, se debe a tres factores.

- En cierta medida se asocia a las brechas del modelo meteorológico descritas anteriormente.
- En este ejercicio solo se modeló el aporte del material particulado fino MP2.5 primario en los receptores definidos por las estaciones de Concón, Quintero y Los Maitenes, sin incluir las transformaciones químicas que generan el material particulado secundario.
- El inventario de emisiones utilizado no especificaba emisiones para material particulado fino MP2.5, generándose un alto grado de incertidumbre entre las distintas referencias que se encontraron, respecto a las emisiones de cada uno de los principales aportantes para el período 2018.

10 Producto ix. Resultados del análisis de la factibilidad técnica, costos de implementación y operación de las metodologías revisadas incluyendo los niveles de predictibilidad y porcentajes de acierto esperados

Este capítulo presenta la factibilidad técnica y los costos asociados a la implementación de las herramientas de pronóstico revisadas, enfocándose en la implementación del Factor meteorológico dentro de las herramientas de pronóstico.

En base a la revisión de herramientas y metodologías utilizadas a nivel nacional e internacional para los sistemas de pronóstico de calidad del aire el modelo sugerido para el pronóstico meteorológico es el modelo World Research and Forecasting WRF acoplado al módulo químico WRF-CHEM utilizando el factor meteorológico propuesto.

Entre las principales fortalezas de esta herramienta se encuentran:

- El respaldo de estar operativo actualmente en el NCEP, Centros de investigación meteorológica y, en su configuración como pronóstico operacional dentro de laboratorios, universidades y empresas.
- Gracias a la contribución de la creciente comunidad de investigadores, incorpora periódicamente los avances en física, análisis numérico y de asimilación de datos.
- El Sistema de software y la utilización de sus códigos son de libre distribución y están desarrollados y mejorados por comunidades de científicas y programadores voluntarios que cuentan con el apoyo de instituciones de diversa índole.
- WRF posee una gran comunidad de usuarios en todo el mundo (más de 48,000 usuarios registrados en más de 160 países), y cada año se publican ejercicios y tutoriales en NCAR.

El modelo WRF ha sido implementado en el país tanto a nivel gubernamental como por diversas empresas, para fines de evaluación ambiental y como pronóstico de Calidad del aire.

Respecto de la factibilidad técnica de implementación se cuenta con la experiencia de desarrollo de la metodología de pronóstico utilizando WRF para MP10, la que se basa en el trabajo científico[113] desarrollado en los pronósticos de Cerro Navia y Pudahuel. Esta técnica aprovecha la alta correlación existente entre el Monóxido de Carbono (CO) y el Material Particulado (MP) durante los episodios críticos, lo que permite utilizar el CO como trazador pasivo del MP10 mediante el uso de factores estadísticos de conversión. La evaluación[114] de desempeño del modelo para MP10 entregó una confiabilidad del pronóstico para un periodo de validación superior al 65% para todas las estaciones monitoras clasificadas como EMRP y un desempeño global de 88% para las 24, 48 y 72 horas de pronóstico.

[113] Forecasting urban PM10 and PM2.5 pollution episodes in very stable nocturnal conditions and complex terrain using WRF-Chem CO tracer mode, Saide, 2011.

[114] Evaluación de desempeño modelo de pronóstico de calidad del aire para MP10, basado en WRF-Chem, trazador CO, entre las regiones Metropolitana de Santiago y Los Lagos", Robles, 2018

Debido a que el inventario de emisiones presenta información insuficiente respecto de las emisiones de MP2.5 y sus precursores, para poder realizar una modelación que incluya transformación química y formación del MP 2.5 secundario, la metodología de WRFCHEM con CO trazador entrega una buena alternativa a implementar. Es necesario realizar un estudio previo para obtener la calibración y ajuste que permite determinar la conversión de los trazadores en concentraciones horarias de MP2.5, basada en los datos observados de las estaciones de monitoreo, lo cual es viable en la zona de estudio debido a que existen estaciones que miden MP2.5 y CO en paralelo. Cabe mencionar que un pronóstico de estas características es más eficiente en la utilización de recursos computacionales, puesto que no resuelve los esquemas químicos completos para determinar el MP2.5.

Respecto del pronóstico asociado a SO2, las emisiones son un factor clave, que es necesario caracterizar de mejor manera, principalmente en su resolución temporal y en la incertidumbre asociada a las emisiones de fuentes fugitivas, las que, debido a sus características, dificultan las metodologías de su medición. Las emisiones revisadas en el Inventario de emisiones del D.S N° 105/2018 para el año 2018 muestran que son 3 las fuentes principales de MP y SO_2 como se presenta en la Tabla 10-1.

Tabla 10-1 Emisiones 2018

Fuente	MP	SO_2
Complejo Termoeléctrico AES GENER	11%	30%
CODELCO Ventanas	12%	63%
Complejo ENAP y Cogeneradora	53%	7%
Subtotal	76%	99%

Fuente: D.S N° 138/05 MINSAL

Debido a que solo 3 Fuentes agrupan el 99% de las emisiones antropogénicas de SO2, es posible implementar un inventario de emisiones dinámico, que incluya la variabilidad de los procesos de emisión, las actividades necesarias para su implementación serían:

- Generar una base de datos con la medición de las emisiones en línea de las principales fuentes de emisión puntuales. La principal dificultad de estas mediciones se relaciona con las emisiones de Codelco Ventanas pues una gran parte son fugitivas, lo que genera dificultades en su medición.
- Caracterizar los ciclos de emisión que se generan para cada una de las fuentes, diario, semanal, mensual, estacional.
- Asociar la información de los ciclos de emisión con los niveles de producción y parámetros operativos de cada una de las fuentes. Por ejemplo, para el caso de Codelco Ventanas, realizar el ejercicio de caracterizar los perfiles de emisiones asociados a las caracterizaciones minero-metalúrgicas de los concentrados a refinar, según plan semanal/mensual. Esto permitiría caracterizar las alzas en las emisiones de SO2 asociadas al procesamiento de concentrados con mayor % de azufre.

- Finalmente generar un inventario de emisiones dinámico, estimado en base a los niveles de producción de las planificaciones de corto plazo semanales/mensuales de cada una de las fuentes de emisión.

Este inventario dinámico entregará información más confiable para el pronóstico en base a la modelación de transporte y dispersión del SO2.

En paralelo a las mejoras al inventario de emisiones se sugiere entrenar una red de aprendizaje automático profundo Deep Learning, utilizando como entradas las mediciones de emisiones en línea, las variables meteorológicas de las salidas del modelo identificadas en este informe como las que generan condiciones de alerta y las mediciones en línea de las concentraciones en las estaciones de monitoreo.

10.1 Implementación del Factor meteorológico

Actualmente el factor de ventilación y el PMCA son ampliamente utilizados como herramienta de gestión de calidad del aire, el factor meteorológico propuesto considera además los rangos de variación de las variables relacionadas con los valores críticos de contaminación, y las configuraciones sinópticas y subsinópticas estudiadas para la zona de estudio en específico.

Para la implementación del Factor Meteorológico es necesario el desarrollo de algoritmos para clasificar las condiciones meteorológicas, este se puede realizar mediante un Análisis de clúster, árbol de decisiones u otros, para cada estación, período diario, estacional y configuración sinóptica, considerando rangos de diagramas de caja (boxplot), y tablas con promedios, percentil 25, 50 y 75 para el período frío y cálido.

Las salidas horarias de meteorología modeladas pueden ser clasificadas según los rangos potencialmente contaminantes definidos en el algoritmo anterior, donde a cada una de estas variables meteorológicas se les asigne un “peso”. Este se puede ajustar mediante red de entrenamiento (deep learning), en base a los valores observados de meteorología y calidad del aire SO2 y MP 2.5

Finalmente se podría Implementar el algoritmo en las salidas de WRF, entregando de manera automatizada el pronóstico categorizado en Bueno, Regular, Malo, evaluando su desempeño. Con esta metodología se esperaría lograr un desempeño global del pronóstico entre 80 y 85%.

Para el desarrollo de esta actividad se debería considerar un equipo de profesionales con un alto grado de especialización en estudios meteorológicos asociados a calidad de aire y modelación de contaminantes atmosféricos, y el tiempo de ejecución se estima en alrededor de 12 meses continuados. Este equipo podría estar conformado por;

- Jefe de Proyecto especialista meteorología y calidad del aire.
- Meteorólogo con conocimiento de modelación.
- Ingeniero experto en modelación.

Las principales actividades a implementar, el cronograma y los costos asociados se presentan en la Tabla 10-2.

Tabla 10-2 Carta Gantt y costos asociados

Actividad		Meses												Costo U.F.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Implementación Modelo WRF	Configuración del Hardware/Software	■												2,115
	Optimización parametrizaciones		■	■	■									
	Operación del modelo WRF				■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Implementación factor meteorológico	Algoritmo categorización	■	■	■										1,785
	Implementación en WRF				■	■								
	Ajustes con datos observados (machine learning)						■	■						
	Evaluación de despeño y puesta en marcha								■	■				
Inventario emisiones dinámico	Base de datos medición en línea de emisiones	■	■	■										2,480
	Caracterizar los ciclos de emisión				■	■	■							
	Perfiles de emisión por fuente							■	■	■				
	Inventario de emisiones dinámico										■	■	■	
Pronóstico machine learning	Desarrollo pronóstico deep learning	■	■	■	■	■	■							1,020

Fuente: Elaboración propia

11 Producto x. Carpeta con presentaciones y resumen de las actividades desarrolladas durante el taller mediante registro fotográfico, ppt, entre otros

De acuerdo a BT, está considerado realizar un taller para la transferencia de capacidades técnicas dirigido a profesionales del Ministerio del Medio Ambiente. Lo anterior con el objetivo de presentar los resultados de la caracterización meteorológica, la categorización de las condiciones de ventilación, los resultados del ejercicio de modelación y las conclusiones del análisis de la metodología de pronóstico y su potencial implementación en la zona de estudio.

A continuación, se presenta objetivos, temario de contenidos y duración del Taller:

Taller de Transferencia
"Estudio Caracterización del factor meteorológico para la calidad del aire y categorización de las condiciones de ventilación para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví"

Objetivo general del taller

"Desarrollar un taller de transferencia de capacidades técnicas a profesionales del Ministerio del Medio Ambiente sobre el uso e interpretación de los resultados del estudio".

Objetivos específicos del taller

a) Presentar resultados de la caracterización meteorológica que explica los episodios/no episodios de contaminación en la zona de estudio.
b) Presentar resultados de la categorización de las condiciones de ventilación del SO_2 y MP2.5 y el Factor Meteorológico.
c) Presentar las herramientas actuales de modelación.
d) Presentar los resultados y realizar transferencia de capacidades técnicas del ejercicio de modelación para el año 2018.
e) Presentar las conclusiones del análisis de la metodología de pronóstico y su potencial implementación en la zona de estudio.

Duración

El curso tiene una duración de media jornada. Duración Total: 4 horas

Participantes
Alrededor de 10 profesionales MMA o quienes determine la contraparte técnica.

Contenidos principales del Taller

MODULO A: Caracterización de la estructura vertical de la atmósfera con identificación de la estabilidad superficial y regional, y su efecto en el ciclo diario y/o estacional del transporte de contaminantes

- Resultados para la estabilidad regional
- Resultados para la estabilidad superficial
- Comportamiento vertical de la atmósfera y la estabilidad según configuración sinóptica para período frío y cálido
- Concentraciones diarias de SO_2 para estaciones de calidad del aire según configuración sinóptica en período frío y cálido

MODULO B: Clasificación de los fenómenos meteorológicos a distintas escalas su frecuencia de ocurrencia y su relación con el desarrollo de eventos de aumento de concentraciones de contaminantes atmosféricos

- Resultados configuraciones sinópticas y de mesoescala
- Frecuencia de ocurrencia
- Configuraciones a escala sinóptica y de mesoescala asociadas a incrementos de concentraciones

MODULO C: Identificación de las variables meteorológicas y su relación con la ocurrencia de eventos de incrementos de las concentraciones de contaminantes

- Resultados identificación de variables meteorológicas
- Ciclos diarios y estacionales
- Rangos de las variables meteorológicas locales y configuraciones sinópticas

MODULO D: Categorización de las condiciones de ventilación en términos de "Bueno, Regulares y Malas"

- Factor de Ventilación
- PMCA
- Factor Meteorológico
- Categorías Bueno, Regular y Malo

MODULO E: Evaluación de las metodologías de pronóstico de calidad del aire revisadas.

- Sistemas de pronóstico Calidad del aire a nivel nacional e internacional
- Resultados evaluación metodologías de pronóstico

- Meteorología observada
- Modelación meteorológica
- Modelación de calidad del aire
- Resultados

Cierre

Conclusiones finales, ronda de preguntas.

Expositores

- Erwin Alegría, Meteorólogo y Administrador de contrato.
- Gerardo Alvarado, Ingeniero especialista redes monitoreo y calidad del aire, Mg gestión y planificación ambiental
- Manuel Merino, Meteorólogo Senior, Jefe de Proyecto
- Maureen Amín, Meteorólogo Senior, Mg gestión y planificación ambiental
- Francisco Jiménez, Ingeniero especialista Modelación

12 Conclusiones y recomendaciones

12.1 Producto i Análisis sobre la calidad de la información meteorológica (superficie y altura disponible) y de calidad del aire, y su potencial uso con fines de pronóstico de las condiciones de ventilación para calidad del aire

1. La visualización de series de tiempo permitió confirmar que más del 95% de la información revisada tiene un comportamiento esperado con algunas situaciones menores o casos puntuales con datos anómalos que fueron identificados y eliminados de la nueva base de datos revisada
2. El posterior análisis de consistencia espacial realizado mediante comparación de series de tiempo y ciclos diarios y el análisis de consistencia temporal mediante comparaciones de ciclos anuales interanuales permite concluir que la información revisada en su conjunto es consistente con patrones de comportamiento de las variables bien definidos que se repiten en los distintos años. Se identificaron algunas diferencias o situaciones específicas para períodos acotados de tiempo en la magnitud de la velocidad de viento, temperatura y radiación solar principalmente, pero no comprometen el uso de la información de las estaciones donde fueron detectadas para los objetivos del estudio.
3. Respecto a las mediciones de calidad de aire la revisión ha permitido confirmar los resultados esperados reportados en estudios anteriores y en los antecedentes del PPDA de CQP.
4. Considerando que la información de las redes de monitoreo son consistentes en cuanto a representatividad de la zona de estudio, pero a la vez tomando en cuenta los objetivos del estudio y la utilidad futura de sus resultados en términos de su potencial uso con fines de pronóstico de condiciones de ventilación y de modelación de calidad del aire, es que se requiere información adicional, tanto para el diagnóstico de las condiciones meteorológicas, como para su pronóstico.

12.2 Producto ii Sugerencias sobre la medición de nueva información meteorológica y sus costos de implementación y operación

1. Dada la relevancia de las mediciones de la torre meteorológica Principal, de gran utilidad para detectar la formación y disipación de inversiones térmicas entre la superficie y 40 metros, es que se sugiere realizar algunas mejoras. La propuesta se traduce en un cambio de ubicación de sensores: cambio del sensor de Radiación Solar instalado a 20 m sobre el nivel del suelo, cambio del sensor de Presión Atmosférica instalado a 20 m sobre el nivel del suelo e incorporación del Cálculo del Sigma Theta. Otras recomendaciones son instalar sensores para medición de Gradiente Vertical de Temperatura, el reemplazo de los

protectores de Radiación con ventilación natural por aquellos de ventilación forzada y la instalación de sensores de viento de mayor sensibilidad.

2. El monitoreo meteorológico de las redes existentes en las Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví entrega información de superficie que requiere ser ampliada incorporando sensores en las mismas estaciones para complementar las mediciones actuales, de modo de obtener información faltante de temperatura, humedad relativa y presión, principalmente, todas éstas son variables que contribuyen a la modulación de las condiciones de ventilación.
3. Complementando las mediciones de superficie, es necesario incluir nueva información de meteorología en altura, de modo de contar con perfiles de temperatura y viento a distintos niveles parar determinar la altura de la capa de mezcla, estabilidad atmosférica y factor de ventilación. Para esto, se proponen alternativas que incluyen perfiladores verticales y campañas de radiosonda. De acuerdo a la revisión de equipos disponibles en el mercado, el más adecuado corresponde al perfilador LAP-RASS, destacando que hay experiencia en Chile de su aplicación con excelentes resultados para apoyar el pronóstico de condiciones de ventilación en Santiago.
4. Considerando que la limitante de incorporar el equipo LAP-RASS puede ser su alta inversión inicial se sugiere como alternativa más económica la instalación de una estación meteorológica en la cima de un cerro cercano a una altura cercana a 1000 m.s.n.m.. Aunque esta alternativa no permite determinar la ubicación de la base de la capa de mezcla, pero hay experiencia de buenos resultados para ampliar o mejorar el cálculo de un índice de estabilidad en apoyo al sistema operacional de pronóstico en Santiago y Temuco.
5. Una opción más económica, respecto a un LAP-RASS es instalar un nefobasímetro, pero este equipo no entrega perfiles verticales de temperatura haciendo una estimación indirecta de la capa de mezcla siendo su principal limitante problemas al realizar mediciones bajo condiciones de niebla y nubosidad baja, condición muy frecuente en la zona en estudio.
6. Debido a la fácil movilidad del globo cautivo se recomienda su uso como elemento de apoyo en el desarrollo de campañas de mediciones complementarias en sectores de interés para el pronóstico meteorológico, principalmente en aquellos periodos del año de mayor frecuencia de episodios críticos. También su uso podría servir de apoyo en la validación de los datos continuos que se obtengan con un equipo SODAR. Por las dificultades operacionales que presenta, su uso permanente no es viable.
7. Dada la importancia por la aplicación que se dará a la data que se obtenga para fines de pronóstico y para garantizar la calidad de ella cualquier alternativa que se implemente debe estar sometida a un riguroso programa de mantención, calibración y aseguramiento de calidad.
8. Para vigilancia meteorológica y pronóstico de la vaguada costera, se sugiere incorporar una estación en el sector de Pichidangui.
9. Para visualizar, hacer seguimiento y estudiar el comportamiento de la pluma o penacho de contaminación que se desplaza desde el Complejo industrial de Ventanas hacia Quintero

en la noche y hacia Puchuncaví en el día, se sugiere contar con cámaras de vigilancia ubicadas en lugares estratégicos de la zona de estudio. Sería importante abordar su implementación, logrando que algunos de los proveedores realicen previamente pruebas locales que permitan evaluar su desempeño.

12.3 Productos iii Caracterización estructura vertical de atmósfera, iv Clasificación de los fenómenos meteorológicos a distintas escalas y v Identificación de las variables meteorológicas, Conclusiones a Escala Regional

1. En relación a las escalas sinóptica y regional, el análisis de los radiosondeos permite concluir que para el periodo de estudio, las configuraciones que presentan las menores alturas promedio de la base de la inversión y por lo tanto de la altura de la capa de mezcla, son el desarrollo y culminación de vaguadas costeras, condiciones postfrontales y altas presiones frías; mientras que las configuraciones que muestran las mayores alturas medias de la base de la inversión térmica son la etapa de disipación de las vaguadas costeras, condiciones prefrontales, sistemas frontales, núcleos fríos y margen anticiclónico.
2. Los promedios diarios de SO_2 muestran una respuesta a las condiciones sinópticas, de mesoescala y escala local imperantes. Sin embargo, se constatan diferencias en Los Maitenes, Quintero y Concón. En la estación Los Maitenes, las mayores concentraciones se presentan en la etapa de desarrollo de las vaguadas costeras, pero también bajo margen anticiclónico, etapa de culminación de las vaguadas costeras y frentes en altura. En Concón, es notable la diferencia en el aumento de concentraciones de SO_2 en la etapa de desarrollo de las vaguadas costeras con el resto de las configuraciones; los valores de SO_2 también aumentan bajo condiciones de culminación de vaguada costera y altas presiones frías. En Quintero, el desarrollo y culminación de las vaguadas costeras son las configuraciones que asocian las mayores concentraciones diarias de SO_2.
3. En comparación con el periodo cálido (octubre-marzo), en el periodo frío (abril-septiembre) las concentraciones y el número de días en que se supera la norma diaria son mayores en las tres estaciones estudiadas. Esto está asociado a las diferentes señales de una mayor estabilidad tanto en la escala regional como local, así como también una menor altura de la capa de mezcla durante la temporada fría.
4. En Los Maitenes, tanto en la temporada fría como en la temporada cálida el desarrollo de vaguada costera es la configuración que asocia las mayores concentraciones, incluso superando la norma diaria en una oportunidad en el periodo frío. También se observan concentraciones relativamente altas asociadas al margen anticiclónico, principalmente en la temporada cálida. En Concón, se observa una situación similar a la registrada en Los Maitenes, el desarrollo de vaguada costera y el margen anticiclónico se asocian a los dos eventos de superación de norma durante la temporada fría (entre 2016 y 2019).
5. Durante la temporada fría, la mayoría de las configuraciones muestran en Santo Domingo, alturas medias de la base de la inversión en superficie o cercanas a ésta, lo que se debería a la persistente formación de inversiones térmicas radiativas, por el enfriamiento nocturno del suelo. Durante la temporada cálida este comportamiento no se aprecia y las

configuraciones que muestran menores alturas de la base de la inversión son el desarrollo y culminación de vaguada costera y altas frías.

6. Las diferencias de temperatura entre base y tope de la inversión son mayores durante la temporada fría, también asociado al mayor enfriamiento superficial durante la temporada fría y en general las diferencias son positivas (para la mediana) con excepción de sistemas frontales y núcleos fríos. Las mayores diferencias positivas se presentan bajo condiciones de desarrollo y culminación de vaguada costera, con diferencias medias por sobre los 10°C, mientras que con margen anticiclónico y disipación de vaguada costera las diferencias son menores.
7. Durante la temporada cálida las mayores diferencias positivas de temperatura se presentan con las tres fases de la vaguada costera y bajo margen anticiclónico. A pesar de estas diferencias positivas, que indican condiciones de estabilidad, las alturas de la base de inversión son más elevadas que en la temporada fría, por lo tanto, la estabilidad no se presenta directamente sobre la capa de mezcla superficial.
8. En Quintero se observa un comportamiento distinto a las otras estaciones. En cuanto a comportamiento medio, dejando de lado por un momento los outliers, durante la temporada fría las mayores concentraciones se asocian a desarrollo y culminación de vaguada costera y en segundo lugar a margen anticiclónico y frente en altura. Sin embargo, las superaciones de norma se presentan aparentemente de manera independiente a la configuración sinóptica regional y se deberían a la alta frecuencia de formación de inversiones radiativas nocturnas en la zona de Quintero. Sin perjuicio de lo anterior, podría también tener un impacto en las alzas de concentraciones en esta estación de monitoreo, las emisiones elevadas en el periodo nocturno de fuentes industriales ubicadas viento arriba, o un deterioro transitorio de la ventilación.
9. El análisis realizado, permite identificar que tanto el desarrollo como la culminación de las vaguadas costeras son las principales configuraciones forzantes de malas condiciones meteorológicas de ventilación y valores altos de SO_2. No obstante, otras configuraciones también mostraron condiciones de estabilidad y reducción de la capa de mezcla superficial, y es importante seguir su evolución con detención; éstas son el margen anticiclónico, condiciones postfrontales, frentes en altura y altas frías.
10. Complementando lo anterior, la alta fría (FA) en niveles como presión en superficie, espesor 1000-500 hPa y temperatura en 925 hPa también presenta valores diferenciadores respecto a las demás configuraciones. El anticiclón semipermanente del Pacífico Sur-Oriental (MA) en relación al espesor 1000-500 hPa y la altura geopotencial de 500 hPa, si bien con menor definición respecto a las distintas fases de evolución de la vaguada costera, se diferencia de la mayoría de las demás configuraciones.
11. La frecuencia de ocurrencia de las configuraciones en los periodos cálido y frío es distinta. En la temporada cálida, prevalece el anticiclón del Pacífico, reduciéndose drásticamente las configuraciones asociadas a los ciclones extratropicales: prefrontal, sistema frontal, post-frontal y alta presión fría. En el periodo frío el sistema climático se desplaza hacia el ecuador, permitiendo el paso de sistemas frontales por la zona central de Chile. El porcentaje de vaguadas costeras, en todas sus fases, se mantiene similar entre temporadas.

12.4 Productos iii Caracterización estructura vertical de atmósfera, iv Clasificación de los fenómenos meteorológicos a distintas escalas y v Identificación de las variables meteorológicas, Conclusiones a Escala Local

1. Respecto a las condiciones a escala local, los datos de temperatura de la torre meteorológica ratifican en buena medida lo observado con los radiosondeos. Las configuraciones que presentan las mayores diferencias positivas en el gradiente de temperatura entre 10 y 40 m son el desarrollo de las vaguadas costeras, las altas presiones frías y la culminación de las vaguadas costeras. Sin embargo, también se observan altos valores de estabilidad (>3°C de diferencia) con margen anticiclónico, post-frontal y frente en altura. La magnitud media del viento en esta capa cercana a la superficie muestra que, salvo en la etapa de disipación de las vaguadas costeras y presencia de sistemas frontales, los valores medios de magnitud del viento son similares para todas las configuraciones. No obstante, la dispersión de los datos muestra que los frentes en altura, desarrollo y culminación de vaguada costera presentan los vientos más débiles.
2. El ciclo diario promedio para cada mes de la diferencia de temperatura entre 40 y 10m en la Torre Meteorológica para el año 2018, muestra un ciclo diario definido, con variaciones en la amplitud y duración de máximos y mínimos. Los meses con mayor número de horas con valores dT>0, corresponden al periodo marzo-septiembre, debido a la mayor duración del período nocturno respecto al periodo estival y consecuentemente un periodo mayor de pérdida de calor por radiación de onda larga durante la noche.
3. El comportamiento del SO_2 ($\mu g/m^3$) v/s diferencia de temperatura 40-10m (°C) presenta respecto al ciclo diario típicamente valores positivos en Quintero y Concón, a la hora en que se producen las máximas concentraciones, normalmente en la noche y madrugada. En Los Maitenes en el periodo en que se producen generalmente las máximas concentraciones (10 a 17 H.L.) se observa un número reducido de valores positivos, prevaleciendo valores negativos.
4. La limitante de la torre meteorológica es que entrega información en la vertical sólo hasta 40 m s.n.s no pudiendo determinarse el espesor de la inversión térmica radiativa, tampoco la altura a la que se encontrarían la base y tope de la inversión térmica de subsidencia.
5. Las rosas de concentraciones de SO_2 y MP2,5 anuales, estacionales y diarias, para Los Maitenes, Quintero y Concón muestran patrones claros respecto a los valores máximos de concentraciones en función de la dirección y magnitud del viento, entregando una información valiosa respecto a los procesos de transporte de contaminantes. Para el SO_2 en las estaciones de Concón y Quintero, las mayores concentraciones se dan en el periodo frío, con brisa nocturna de componente SE en Concón y ENE en Quintero de intensidad débil a ligera. En Los Maitenes las mayores concentraciones se pueden observar en cualquier época del año, pero durante el día (brisa diurna), con una componente del viento WNW de intensidad débil a ligera. Respecto al MP2,5, la señal no es clara, debido a que las concentraciones son en general bajas. Concón presenta mayores valores durante la temporada fría, en el período nocturno, con vientos del SE de intensidad débil a ligera.

Quintero en tanto presenta valores más altos en Enero, Junio y Julio con vientos del NE ligeros y cercanos a la calma en los meses de invierno. A nivel de ciclo diario, Quintero es más variable, y los mayores valores pueden observarse desde la madrugada hasta las primeras horas de la tarde, con vientos débiles de componente Este en la madrugada y mañana, y ligeros a moderados durante la tarde con una componente SW. Los Maitenes presenta máximos entre abril y noviembre, con vientos del ESE en abril y del SW noviembre de intensidad ligera, y considerando el ciclo diario, Los Maitenes presenta mayores concentraciones durante el día, con vientos débiles a ligeros de componente NW.

12.5 Producto vi Categorización de las condiciones de ventilación

1. A través de los diferentes análisis efectuados y hallazgos encontrados en el estudio, se lograron categorizar las distintas configuraciones de escala sinóptica y subsinóptica que modulan las condiciones de ventilación, caracterizando un Factor Meteorológico que incorpora las distintas configuraciones meteorológicas asociadas a episodios/no episodios, con sus respectivos rangos de variación de las variables observadas a escala local; esto para cada una de las zonas comprendidas en el estudio.
2. Se logró constatar que algunas de las configuraciones presentan valores distintivos, que permiten caracterizar las configuraciones asociadas a un factor meteorológico de ventilación (o PMCA) en términos de Bueno, Regular y Malo, lo que a su vez se refleja en un rango de concentración de SO_2 esperado.
3. Se identificaron para cada una de las configuraciones, y para el período frío y cálido, los rangos de variación de las variables más relevantes a diferentes niveles y de los parámetros más significativos, para las tres estaciones representativas de las distintas comunas estudiadas. Estas variables corresponden a información proporcionada por el Sonda de Santo Domingo y la Torre meteorológica Principal.
4. Los valores medios del promedio, mediana (percentil 50) y rango intercuartil (percentil 25 y 75) de las variables más relevantes encontradas, y separadas por configuración sinóptica, estación y período frío/cálido del sonda son: presión en superficie, altura de la inversión, diferencia de temperatura base y tope inversión, altura geopotencial en 1000, 925, 850 y 500 mgp, la temperatura y humedad relativa en superficie, 1000, 925, 850 y 500 hPa, espesor 1000-500 mgp; en tanto que las variables de la Torre corresponden a: la diferencia de temperatura 40-10m y el viento medio 10-40m. De todas estas variables destacan las inversiones, la presión en superficie, la temperatura y humedad relativa en 925 hPa, espesor 1000-500 hPa y la altura en 500 hPa.
5. A partir de los resultados de este estudio, principalmente de las tablas con la Categorización del Factor Meteorológico y las tablas con los valores medios de las variables relevantes extraídas de los diferentes diagramas de caja analizados (boxplot), se podrá profundizar en metodologías de pronóstico de tipo estadístico o dinámico.

12.6 Producto vii Evaluación de las metodologías de pronóstico de calidad del aire

1. A nivel nacional se cuenta con experiencia en el modelo WRF-CHEM, utilizado en su modo CO trazador, para pronosticar material particulado MP10, este se encuentra implementado mediante el MMA en varias ciudades como Santiago, Rancagua, Temuco y Coyhaique.
2. A nivel internacional el modelo WRF se encuentra ampliamente implementado para meteorología y para calidad del aire se observa bastante el uso de CMAQ, el cual podría ser una buna alternativa para implementación, pero no existe información suficiente acerca de su implementación y desempeño a nivel nacional.
3. En base al análisis de las distintas herramientas y metodologías de pronóstico presentadas se observa que la herramienta con mayor potencial de implementación en la zona de estudio es el modelo de pronóstico meteorológico WRF acoplado al módulo fotoquímico CHEM para el transporte de contaminantes.

12.7 Producto viii Resultados del ejercicio de modelación

1. Respecto de la modelación meteorológica

El modelo en cuanto a magnitu de viento, captura bien el ciclo diario, pero sobrestima en todas las estaciones, presentando un sesgo positivo para la magnitud de 2.20, 2.04 y 2.73 m/s respectivamente. El error cuadrático medio promedio para las 3 estaciones es de 2.91, 2.81 y 3.38 m/s respectivamente.

En cuanto a direcciones de viento captura bien el ciclo para las 3 estaciones, pero no logra reproducir la dirección con componente Este en horas de la madrugada, lo que se puede atribuir a las bajas velocidades que se observan para esta dirección en esas horas, por lo que el modelo no es capaz de asimilar y reproducir las direcciones en este periodo.

Estos sesgos se asocian a que la parametrización utilizada en el modelo no fue la más adecuada para el terreno complejo de la zona, por lo que se recomienda utilizar una parametrización de capa limite que sea capaz de captar la influencia topográfica.

2. Respecto de los inventarios de emisiones

El inventario de emisiones para el PPDA recibido, presenta brechas importantes principalmente en cuanto a que no se presentan valores para MP2.5, y la estimación de esta en base a factores genera incertidumbre debido a la baja coherencia entre las distintas fuentes de referencia, principalmente DIA, en cuanto a la modelación de este solo se puede realizar respecto del primario pues no se presenta la información suficiente sobre sus precursores para modelar el MP2.5 secundario.

3. Respecto de los resultados de calidad del aire modelados

Las concentraciones de SO_2 modeladas se observa que el modelo describe bien el ciclo diario de éstas, pero presenta un sesgo medio negativo de -18,08, -23,48, y -19,88 μg/m^3N en las estaciones Concón, Quintero y Los Maitenes respectivamente, y un promedio de error cuadrático medio de 62 μg /m^3N, lo que indica una gran subestimación. Esta subestimación se atribuye principalmente a la sobreestimación que realiza el modelo de la magnitud de viento.

Las concentraciones de SO2 fueron compensadas mediante un factor de ajuste de magnitud de viento modelado/observado, con lo que se observa un comportamiento con una mejor captura del ciclo diario de emisiones

El desempeño se midió mediante una tabla de contingencia, en la que se evalúa el número de días bien pronosticados, en los que el máximo horario de SO_2 diario es mayor o igual a 350 μg /m^3N. Esta evaluación se realizó enfocado en objetivo final que es implementar una herramienta que permita pronosticar las alertas asociadas a la normativa vigente.

- En la estación Concón el modelo alertó 1 de los 4 días en que se generó un sobrepaso, mientras que genero 19 falsas alarmas.
- En la estación Quintero el modelo alertó 4 de los 42 días en que se generó un sobrepaso, mientras que genero 9 falsas alarmas.
- En la estación los maitenes el modelo alertó 31 de los 32 días en que se generó un sobrepaso, mientras que genero 79 falsas alarmas.

Si bien la estación Los maitenes es la que presenta el mejor acierto en cuanto a los días con acierto en el pronóstico de sobrepaso, esto no implica necesariamente un mejor desempeño, puesto que luego del ajuste por factor de corrección de magnitud de viento, se sobrestimaron las concentraciones, lo que conlleva en una gran cantidad de falsos positivos o alarmas.

Respecto de los resultados obtenidos para MP2.5, no es interesante calcular estadígrafos al respecto, debido al gran sesgo observado a simple vista. Esta gran diferencia que se presenta en cuanto a las concentraciones modeladas y observadas, se debe a tres factores.

- En cierta medida se asocia a las brechas del modelo meteorológico descritas anteriormente.
- En este ejercicio solo se modelo el aporte del material particulado fino MP2.5 primario en los receptores definidos por las estaciones de Concón, Quintero y Los Maitenes, sin incluir las transformaciones químicas que generan el material particulado secundario.

4. El inventario de emisiones utilizado no especificaba emisiones para material particulado fino MP2.5, generándose un alto grado de incertidumbre entre las distintas referencias que se encontraron.

12.8 Producto ix Resultados del análisis de la factibilidad técnica, costos de implementación y operación de las metodologías revisadas

1. En base a la revisión de herramientas y metodologías utilizadas a nivel nacional e internacional para los sistemas de pronóstico de calidad del aire el modelo sugerido para el pronóstico meteorológico es el modelo World Research and Forecasting WRF acoplado al módulo químico WRF-CHEM utilizando el factor meteorológico propuesto.
2. Debido a que el inventario de emisiones presenta información insuficiente respecto de las emisiones de MP2.5 y sus precursores, para poder realizar una modelación que incluya transformación química y formación del MP 2.5 secundario, la metodología de WRFCHEM con CO trazador entrega una buena alternativa a implementar, se sugiere realizar un estudio previo para obtener la calibración y ajuste que permite determinar la conversión de los trazadores en concentraciones horarias de MP2.5. Este tipo de pronóstico es más eficiente en la utilización de recursos computacionales.
3. Debido a que solo 3 Fuentes agrupan el 99% de las emisiones antropogénicas de SO2, se sugiere implementar un inventario de emisiones dinámico, que incluya la variabilidad de los procesos de emisión
4. Se recomienda que los resultados obtenidos de este estudio sobre la caracterización del Factor meteorológico sean implementados en la herramienta pronóstico de calidad del aire. Para esto se describieron las actividades que debiesen desarrollarse y se estimo el equipo de trabajo para desarrollar la implementación en plazo de 9 meses y un valor de 1785 U.F.

13 Bibliografía

Bossi, M., Matich, D., Pignani, J.M. (2000). Contaminación, Meteorología y Estabilidad Térmica.

CENMA (Enero 2013). Informe para Codelco División Ventanas.

CENMA (Marzo 2013). Informe para Codelco División Ventanas.

Dirección Meteorológica de Chile (2001).*Climatología de Chile*.

Djuric (1994). Weather Analysis

Freitas, S. R., Longo, K. M., Silva Dias, M. A. F., Chatfield, R., Silva Dias, P., Artaxo, P., Andreae, M. O., Grell, G., Rodrigues, L. F., Fazenda, A., and Panetta, J.: The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 1: Model description and evaluation, Atmos. Chem. Phys., 9, 2843-2861, doi:10.5194/acp-9-2843-2009, 2009.

http://brams.cptec.inpe.br/papers/catt-brams-paper1.pdf

Garreaud, R., Rutllant, J., Fuenzalida, H. (2000). Coastal Lows in the Subtropical West Coast of South America: Mean Structure and Evolution.

Garreaud, R., Rutllant, J., Fuenzalida, H. (2001). Coastal Lows along the Subtropical West Coast of South America: Mean Structure and Evolution.

Garreaud, R., Rutllant, J., Fuenzalida, H (2002). Coastal along the Subtropical West Coast of South America: Mean Structure and Evolution. Mon. Wea. Rev. 130:75-88

Garreaud, R., Muñoz, R. (2004). The Low-Level Jet of West Coast of Subtropical South America:Mean Structure and Variability. Monthly Weather Review 133:2246-2261.

Garreaud, R., Rutllant, J. (2006). Variabilidad atmosférica de alta frecuencia en el borde oriental del Pacífico sureste.

Geiger, R., Aron, R. H., and Todhunter, P., 1995, The climatenear the ground, 5th edn (Cambridge: Harvard UniversityPress)..

Giménez R., X. (2009). Estudio de la relación entre la situación meteorológica a escala sinóptica y la contaminación a escala regional. Aplicación al ozono troposférico en Catalunya.

INFODEP (Julio 2016). Elaboración de una base digital del clima comunal de Chile: línea base (1980-2010) y proyección al año 2050.

Li, Xiang& Peng, Ling & Shao, Jing & Chi, Tianhe. (2016). Deep learning architecture for air quality predictions. Environmental Science and Pollution Research. 23. 10.1007/s11356-016-7812-9.

Longo, S. R. Freitas, M. Pirre 2013, The chemistry CATT–BRAMS model(CCATT–BRAMS 4.5): a regionalatmospheric model system for integratedair quality and weather forecasting andresearch

Muñoz, R. C. &Undurraga, A. A. (2010). Daytime mixed layer over the Santiago Basin: Description of two years of observations with a lidar ceilometer. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 49(8), 1728-1741.

Muñoz, R. C., Zamora, R. A. & Rutllant, J. A. (2011). The coastal boundary layer at the eastern margin of the southeast Pacific (23.4 S, 70.4 W): Cloudiness-conditioned climatology. Journal of climate, 24 (4), 1013-1033.

Muñoz Magnino, R. &Alcafuz, R. I. (2012). Variability of urban aerosols over Santiago, Chile: Comparison of surface PM10 concentrations and remote sensing with ceilometer and lidar.

Nuñez, C. (2002). Altura de la capa de mezcla: Caracterización experimental y aplicación de un modelo meteorológico para el estudio de su evolución diurna. Memoria para optar al título de doctor.

Rutllant, J. (1973). Factores Meteorológicos en la contaminación atmosférica de Santiago.

Rutllant, J. (1981). Subsidencia forzada sobre la ladera andina occidental y su relación con un episodio de contaminación atmosférica en Santiago. Tralka, 2 57-76.

Rutllant J., Salinas, H. (1983). Caracterización meteorológica de situaciones de alto potencial de contaminación atmosférica en Chile Central.

Rutllant, J. (1993). Coastal lows and associated southerly wind events in north-central Chile.

Rutllant, J. (1994). On the generation of coastal lows in Central Chile.

Rutllant J., Garreaud R. (1994). Meteorological Air Pollution for Santiago de Chile: Towards an objective episode forecasting.

Rutllant, Garreaud. (2006). Contaminación Atmosférica Urbana: Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Editor Morales R. Capítulo Merino, M.

Toon et al. (1988) Model: Community Aerosol and Radiation Model for Atmospheres (CARMA)

Sánchez, Antonio Bernardo; Ordóñez, Celestino; Lasheras, Fernando Sánchez; de Cos Juez, Francisco Javier; Roca-Pardiñas, Javier. Forecasting SO_2 Pollution Incidents by means of Elman Artificial Neural Networks and ARIMA Models. Abstr. Appl. Anal. 2013, Special Issue (2013), Article ID 238259, 6 pages. doi:10.1155/2013/238259. https://projecteuclid.org/euclid.aaa/1393449594

Sanguineti (2001). Pronóstico de Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica en Santiago. Clima zona central.

Stull, R. B. (2012). An introduction to boundary layer meteorology (Vol. 13).Springer Science & Business Media.

Wilks, D. S. (2011). Statistical methods in the atmospheric sciences (Vol. 100). Academicpress.

14 Anexos

En volumen II del Presente Informe Final Revisión 1 se incluyen los siguientes Anexos:

1 Anexo Series de tiempo para visualizar datos recibidos para revisión y análisis, período 2010 a 2019

2 Anexo Ejemplo de casos de análisis de visualización de datos

3 Anexo Ejemplo de casos de análisis de consistencia espacial y temporal

4 Anexo Porcentajes de datos revisados y disponibles para el estudio

5 Anexo Antecedentes generales climatológicos

6 Anexo Configuraciones climatológicas a nivel sinóptico

7 Anexos del equipo consultor en la caracterización meteorológica y categorización de las condiciones de ventilación

8 Anexo Ciclos meteorológicos diarios promedios de la magnitud del viento

9 Anexo Ciclo diario de la diferencia de Temperatura 40-10m

10 Anexo Comparación de SO_2 v/s diferencias de temperatura 40_10

11 Anexo Ciclos diarios estacionales de SO_2 y MP2,5 v/s velocidad de viento

12 Anexo Rosas de concentración de SO_2, ciclo diario promedio 2016-2019

13 Anexo Rosas de concentración de SO_2, ciclo anual promedio 2016-2019

14 Anexo Rosas de concentración de SO_2, promedio anual 2016-2019

15 Anexo Rosas de Viento para todas las estaciones, periodo 2016-2019

16 Anexo Análisis de episodio y superaciones de Norma de SO2, periodo 2016-2019

17 Anexo sistemas de pronostico

18 Anexo modelo WRF Ejercicio 2

19 Anexos en formato digital