



dictuc
INGENIERÍA QUE TRANSFORMA

Informe 1535747

ORIGINAL

Servicio de Modelación de calidad del aire para la zona de Quintero-Puchuncaví

Para: Superintendencia del Medio Ambiente

Santiago, 10 de agosto de 2020

Informe Final

Empresa



Certificada

**Título del Proyecto**

Servicio de modelación de calidad del aire para la zona de Quintero-Puchuncaví

Autores:

Jefe de proyecto: Héctor Jorquera González

Dictuc S.A.

Vicuña Mackenna N° 4860, Macul – Santiago

Datos Mandante

Razón Social: Superintendencia del Medio Ambiente

RUT: 61.979.950-k

Dirección Teatinos #280 Piso 8, Santiago

Cuerpo del informe

61 hojas (incluye portada)

Fecha del informe

10/08/2020

Información Contractual

OC N° 611669-1121-SE19

Contraparte técnica

Nombre: Juan Pablo Rodríguez Fernández

Cargo: Jefe Sección de Calidad del Aire y Emisiones Atmosféricas

E-mail: jrodriguez@sma.gob.cl

Resumen

Este Informe presenta los resultados finales del servicio de modelación de calidad del aire para la zona de Quintero-Puchuncaví, V Región

Sr. Héctor Jorquera G.

Profesor Responsable

Dictuc S.A.

Sr. Felipe Bahamondes

Gerente General

Dictuc S.A.

Este Informe anula y reemplaza al Informe N°1525926



Servicio de modelación de calidad del aire para la zona de Quintero-Puchuncaví

Informe Final

Página 2 de 61

Código V01: FI-A.03-DSA



NORMAS GENERALES

- El presente informe presenta los resultados finales del estudio: “Servicio de modelación de calidad del aire para la zona de Quintero-Puchuncaví”, desarrollado durante los meses de enero a junio 2020.
- El presente informe fue preparado por **Dictuc** a solicitud del **Mandante**, bajo su responsabilidad exclusiva.
- Los alcances de este estudio están definidos explícitamente en la Sección 3 del presente informe. Las conclusiones de este informe se limitan a la información disponible para su ejecución.
- Para el desarrollo de este estudio **Dictuc** utilizó información individualizada en la Sección 4 del presente Informe.
- La información contenida en el presente informe no podrá ser reproducida total o parcialmente, para fines publicitarios, sin la autorización previa y por escrito de **Dictuc** mediante un Contrato de Uso de Marca.
- El **Mandante** podrá manifestar y dejar constancia verbal y escrita, frente a terceros, sean éstos autoridades judiciales o extrajudiciales, que el trabajo fue preparado por **Dictuc**, y si decide entregar el conocimiento del presente informe de **Dictuc**, a cualquier tercero, deberá hacerlo en forma completa e íntegra, y no partes del mismo.
- El presente informe es propiedad del **Mandante** sin embargo si **Dictuc** recibe la solicitud de una instancia judicial hará entrega de una copia de este documento al tribunal que lo requiera, previa comunicación por escrito al **Mandante**.
- El presente informe es resultado de las metodologías desarrolladas por **Dictuc**, del alcance del informe encomendado y de los antecedentes que el **Mandante** puso a disposición de **Dictuc**. El **Mandante** acepta expresamente que los resultados del presente informe pueden en definitiva, no serles favorables a sus intereses particulares.
- El **Mandante** declara conocer y aceptar los términos y condiciones generales para la prestación de servicios, disponibles para todo el público en su sitio web oficial: <http://www.dictuc.cl/tyc>



CONTENIDO

1	Introducción	8
2	Objetivos del Estudio.....	9
2.1	Productos entregables	10
3	Alcances	10
4	Metodología y plan de trabajo.....	11
4.1	Plan de Trabajo	11
4.2	Metodología	11
5	Compilación y análisis de la meteorología en la zona de Quintero-Puchuncaví	13
5.1	Escenario de meteorología para el modelo CALPUFF	13
5.2	Análisis de la meteorología en el periodo 15 – 26 agosto 2018.	15
5.2.1	Intensidad de los vientos superficiales.....	15
5.2.2	Direcciones de los vientos superficiales	17
5.2.3	Alturas de mezclado modeladas en la zona	18
5.2.4	Perfiles verticales de temperatura observada en Santo Domingo	19
6	Modelación de calidad del aire para SO ₂	21
6.1	Valores observados de SO ₂ en la red SINCA.	21
6.2	Escenario de emisiones de SO ₂	23
6.3	Evaluación del desempeño de las modelaciones de SO ₂	24
6.3.1	Distribuciones temporales de las modelaciones de SO ₂ , año 2018.....	25
6.3.2	Distribuciones temporales de las modelaciones de SO ₂ , 21-23 de agosto 2018 para Quintero	28
6.3.3	Análisis estadístico de la modelación de SO ₂	30
7	Modelaciones de las emisiones de estanques API de ENAP.....	34
7.1	Estimación de las emisiones evaporativas de los separadores API de ENAP.	35
7.1.1	Uso de la metodología EPA-EEUU.	35
7.1.2	Estimación de las concentraciones de COV en la fase acuosa de los separadores API de ENAP.....	35
7.2	Resultados de las modelaciones de dispersión de emisiones de ENAP.....	38
7.2.1	Modelación de dispersión de HCHO de ENAP: trayectorias de plumas, 21 de Agosto	42
7.2.2	Modelación de dispersión de HCHO y H ₂ S de ENAP: concentraciones en Quintero, 21 al 23 de agosto.	47
8	Caso de otras emisiones de COV en la zona	50
8.1	Caso de estanques de almacenamiento de OXIQUM	50
8.2	Caso de estanques de almacenamiento de COPEC	52
8.3	Caso de las emisiones del complejo termoelectrico de Ventanas de AES Gener	54
8.4	Resultados de la modelación de todas las fuentes de emisión de COV	54
9	Conclusiones	58

Servicio de modelación de calidad del aire para la zona de Quintero-Puchuncaví

Informe Final

Página 4 de 61

Código V01: FI-A.03-DSA



RESUMEN EJECUTIVO

En este estudio¹ se analizó la situación de la zona de Quintero-Puchuncaví para el periodo del 17 al 26 de agosto de 2018, el cual incluye un episodio de aumento de consultas médicas en Quintero, el que comenzó a manifestarse con consultas médicas el día 21 de agosto y se prolongó toda esa semana, alcanzando un valor máximo el día 23 de agosto.

Con respecto a la meteorología, se constató que entre los días 20 y 23 de agosto la velocidad del viento fue baja en todas las estaciones de la red de monitoreo, y que las alturas de mezclado también fueron bajas en esos días, lo que indica malas condiciones de ventilación de los contaminantes emitidos en la zona. Además, las direcciones de los vientos medidas en dichas estaciones para el periodo del 20 al 23 de agosto mostraron que los vientos se movían desde la zona industrial hacia Quintero, entre la madrugada y el mediodía. Se verificó también que la atmósfera cerca del suelo se fue estabilizando progresivamente a partir del 18 de agosto, alcanzándose el 21 de agosto una fuerte inversión térmica a aproximadamente 400 m sobre el suelo, impidiendo la mezcla vertical de contaminantes en la zona, esta condición mejoró posteriormente el 22 de agosto y el 23 de agosto se volvió a condiciones similares a las del 18 de agosto. En resumen, las malas condiciones de dispersión en los días 20 a 22 de agosto promovieron altas concentraciones de los contaminantes emitidos en la zona en esas fechas.

Para simular la distribución espacial de la dispersión de emisiones atmosféricas en la zona de estudio, se empleó el modelo de dispersión CALPUFF (versión 7). La meteorología fue construida con el modelo meteorológico CALMET, usando datos observados superficiales de meteorología (vientos, temperatura, humedad, cobertura de nubes) de 10 estaciones de monitoreo y datos en altura generados por un modelo meteorológico global (NCEP/NCAR), toda esta información está disponible en dominio público. Finalmente, el modelo de dispersión se aplicó en una grilla de 250 m de resolución horizontal, de manera de poder capturar adecuadamente la complejidad del terreno (variabilidad espacial del uso del suelo) en la zona costera de Quintero - Puchuncaví.

¹ Este estudio difiere del realizado por DICTUC en julio de 2019 (Informe N°1525926), principalmente porque ahora se incluye más antecedentes técnicos respecto a las emisiones en la zona, una modelación de calidad del aire basada en observaciones de la red de monitoreo ambiental y no en modelaciones de meteorología, y se han modelado todas las fuentes de COV en la zona. Por esta razón el presente Informe N°1535747 anula y reemplaza al informe N°1525926. Ver Sección 1 de este Informe para más antecedentes.



Para evaluar el desempeño del modelo de dispersión, se ha modelado todas las fuentes emisoras de SO₂ en la zona de estudio (Quintero-Puchuncaví) y se ha comparado dichas modelaciones con las observaciones de las estaciones de monitoreo de calidad del aire más cercanas a la zona de Quintero (estaciones Los Maitenes, Quintero y Centro Quintero). La información de las emisiones de SO₂ del complejo termoeléctrico Ventanas de AES Gener y las de la chimenea de la Planta de Ácido de la fundición Codelco Ventanas se conocen por el monitoreo continuo de ellas, con resolución temporal horaria. Las emisiones de la chimenea principal de la fundición Codelco Ventanas se conocen a partir de los balances de masa con resolución mensual. Se modelaron las emisiones fugitivas de la nave de la Fundición Codelco Ventanas, expresándolas como una fuente de línea con boyancia, de acuerdo a la recomendación de los desarrolladores de CALPUFF. Las emisiones fugitivas se estimaron a partir de los balances de masa disponibles para los procesos de la fundición.

Se hizo un análisis global (para todo el año 2018) del desempeño del modelo CALPUFF, comparando los patrones temporales para esas estaciones de monitoreo SINCA. Se obtuvo que el modelo CALPUFF es capaz de representar adecuadamente las concentraciones de SO₂ observadas en las esas estaciones de la red del monitoreo, especialmente en la estación Quintero entre la medianoche y la mañana. Este comportamiento se constató también para el episodio del 21 al 23 de agosto de 2018, ya que el modelo predice que hay transporte de contaminantes desde la zona industrial hacia Quintero en la madrugada y por las mañanas. Luego, el modelo CALPUFF es capaz de representar la dispersión de contaminantes atmosféricos en la zona de Quintero, especialmente en condiciones nocturnas y matinales.

A continuación, se utilizó el modelo de dispersión CALPUFF para modelar las emisiones evaporativas de compuestos orgánicos volátiles (COV) provenientes del sistema de separadores API de ENAP. Este sistema de separadores por gravedad recibió el drenado de la fase acuosa de un estanque de almacenamiento de crudo a partir del 17 de agosto de 2018. Dicha descarga del estanque contenía agua con hidrocarburos disueltos en ella, además de sulfuro de hidrógeno (H₂S) y formaldehído (HCHO); éste último compuesto (HCHO) se utiliza como sustancia secuestrante del H₂S en operaciones de descarga de petróleo crudo desde barcos a estanques de almacenamiento de crudo como los de ENAP. Las emisiones de los separadores API se estimaron usando la metodología recomendada por la Agencia de Protección del Ambiente de EEUU (U.S. EPA) para este tipo de unidades de separación usando la planilla de cálculo² "*refinery_wastewater_emissions_tool_2011*".

² Fuente: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/emissions-estimation-protocol-petroleum-refineries>



Al realizarse la modelación de las emisiones de los citados estanques API de ENAP, se encuentra que ellas alcanzan la zona de Quintero a partir de la medianoche de los días 21 a 23 de agosto, extendiéndose esta condición meteorológica hasta el mediodía. Las concentraciones modeladas de HCHO en la zona de Quintero son consistentes con los niveles que causan síntomas en la salud de las personas adultas, mientras que para el caso del H₂S hubo excedencias al umbral olfativo de este compuesto. No hay otras fuentes de HCHO ni de H₂S en la zona industrial, al norte de Quintero, que fue la dirección desde donde sopló el viento en las noches y mañanas del 21 al 23 de agosto.

Además, se modelaron las restantes emisiones de COV en la zona, provenientes de los estanques de las empresas COPEC y OXIQUM (usando la metodología TANKS de la EPA de EEUU), así como las emisiones de COV de la central termoeléctrica Ventanas de AES Gener. Se asumió que todas las emisiones de COV de COPEC y OXIQUM correspondían a compuestos aromáticos (supuesto pesimista). Se concluyó que todas estas fuentes evaporativas aportan menos del 5% a las concentraciones totales de COV (aromáticos) modeladas en Quintero, y que esas fuentes no emiten ni HCHO ni H₂S.

Al analizarse las concentraciones modeladas totales de COV aromáticos (benceno, tolueno, xilenos y etilbenceno) en la zona de Quintero, se encuentra que dichas concentraciones no superan los valores umbrales olfativos establecidos para adultos (en promedio) para estos compuestos aromáticos. Sin embargo, se podrían superar los niveles de afectación para niños, adultos mayores o enfermos crónicos que pueden ser más sensibles a la exposición a la combinación de todos esos contaminantes. En todo caso, en la modelación de COV provenientes de ENAP no se estimó el caso más pesimista de emisiones de COV aromáticos, por lo que los resultados modelados podrían incluso ser mayores a los presentados en este informe (2,5 veces más para benceno y tolueno, por ejemplo).

Por lo tanto, se ha establecido una relación de causalidad entre: i) el trasvase de agua decantada en estanques de almacenamiento de petróleo crudo de ENAP a los estanques separadores API de la misma empresa, ii) las subsiguientes emisiones de HCHO, H₂S y COV aromáticos desde dichos estanques al aire, iii) la dispersión de esas emisiones hacia la zona de Quintero en las noches y mañanas del 21 al 23 de agosto, y iv) los aumentos en consultas médicas en Quintero entre el 21 y 23 de agosto. No hay otras fuentes emisoras que puedan explicar dichos efectos en salud, puesto que: a) no hay otras fuentes que emiten HCHO ni H₂S en la zona al norte de Quintero, b) las emisiones de COV provenientes de las otras empresas que almacenan COV aportan menos del 5% de las concentraciones totales modeladas de COV en la zona de Quintero durante los episodios de aumentos de consultas médicas entre el 21 y 23 de agosto.

Servicio de modelación de calidad del aire para la zona de Quintero-Puchuncaví

Informe Final

Página 7 de 61

Código V01: FI-A.03-DSA



1 Introducción

La Superintendencia del Medio Ambiente (en adelante “El Cliente”) solicita a DICTUC S.A. (en adelante, “el Consultor”) la ejecución de un estudio de modelación de calidad del aire para la zona Quintero-Puchuncaví. El estudio incluye la compilación de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV), sulfuro de hidrógeno (H_2S), formaldehído (HCHO) y anhídrido sulfuroso (SO_2) de las actividades industriales en dicha zona, y su posterior modelación, para el año 2018 completo, incluyendo el análisis detallado de un episodio ocurrido entre el 21 y 23 de agosto.

Esta es la segunda vez que el Consultor realiza este tipo de análisis. En el análisis anterior, realizado en julio de 2019 (Informe N°1525926, 29 de julio 2019), el Consultor realizó un análisis de dispersión de contaminantes atmosféricos empleando una modelación numérica de la meteorología en la zona (traspasada por el Mandante), junto con una metodología simple de estimación de emisiones atmosféricas, realizando un análisis simplificado para una sola fuente emisora (ENAP), y sin evaluar el desempeño del modelo de dispersión. En este segundo informe, se ha mejorado sustancialmente la información meteorológica empleada en la modelación de la dispersión de las emisiones, ya que esta vez se usa toda la información meteorológica observada en la red de monitoreo de la zona de Quintero-Puchuncaví; además el modelo de dispersión se ha aplicado con una mayor resolución espacial horizontal (250 m) que en la modelación numérica original (1 km). Estas dos mejoras en la modelación de la dispersión de contaminantes son significativas, ya que la zona presenta un terreno complejo, con mucha heterogeneidad en el uso del suelo, ya que las fuentes emisoras y población se encuentran ubicadas a lo largo del borde costero. Con estas mejoras se obtuvo un modelo de dispersión con un buen desempeño para representar el transporte de contaminantes atmosféricos en la zona de estudio. Además, en este segundo análisis, el Consultor ocupó una metodología específica para cada fuente de modelación considerada en el análisis, utilizando más información disponible (traspasada por el Mandante) lo cual también representa una mejora en la calidad de la información empleada en este segundo análisis, donde se han modelado todas las fuentes emisoras de COV en la zona de Quintero-Puchuncaví.



2 Objetivos del Estudio

- a) Compilación y estimación de las emisiones de las siguientes fuentes:
 - 1) COV: ENAP (Separadores API, Piscinas y canaletas), OXIQUIM, COPEC, Central termoeléctrica Ventanas.
 - 2) SO₂: Fundición Ventanas (nave + planta de ácido) más central termoeléctrica Ventanas.
 - 3) H₂S: Escenario de fuga u otro, a definir en conjunto con el Cliente.
 - 4) HCHO: Escenario de una emisión de formaldehído, usado para disminuir el contenido de H₂S del crudo, a definir en conjunto con el Cliente.
- b) Compilación de la meteorología disponible en la zona (año 2018 completo) para observaciones superficiales, así como los radiosondeos realizados en Santo Domingo y otra información de monitoreo disponible en la zona (además de la existente en el SINCA).
- c) Modelación de dispersión atmosférica en la zona de Quintero-Puchuncavi, utilizando el software CALMET-CALPUFF. El modelo CALMET será operado en modo 'observaciones', usando la información recopilada en b) para generar los campos meteorológicos requeridos por CALPUFF.
- d) Evaluación estadística del desempeño del modelo CALPUFF para el SO₂, usando indicadores estadísticos estándar para esos fines (sesgo, RMSE, coeficiente de correlación, etc.) en conjunto con criterio de evaluación de modelos de dispersión.
- e) Evaluación del escenario de emisión de COV, desde separador API + Canaletas y piscinas (se definirá en conjunto con el Cliente, el detalle de este análisis).
- f) Evaluación del escenario de emisión del formaldehído (HCHO), a ser definido en conjunto con el Cliente.
- g) Análisis y descripción de resultados para los eventos del 21 al 23 de agosto, en receptores de interés.
- h) Análisis de limitaciones del modelo y datos utilizados.
- i) Explicación del tratamiento del modelo, a las condiciones de mala ventilación (utilizar pronóstico meteorológico del MMA para la zona) para el periodo previo y posterior al evento.
- j) Una descripción técnica, pero sencilla de cómo opera el modelo CALPUFF, para que sea accesible a una audiencia general, sin requisitos de formación técnica especializada.
- k) Informe técnico con los resultados del análisis, presentando los resultados de manera que sean accesibles para personas sin formación técnica especializada.



2.1 Productos entregables

- a) Base de datos de emisiones horarias de SO₂, H₂S, HCHO y COV en la zona de Quintero-Puchuncaví (archivos digitales).
- b) Base de datos meteorológicas depurada (sin valores extremos o anómalos).
- c) Archivos de configuración y resultados de CALMET-CALPUFF-CALPOST.
- d) Descripción de cómo opera el modelo CALPUFF y como maneja los distintos tipos de fuentes emisoras.
- e) Informe con evaluación estadística del desempeño de la modelación, para el caso del SO₂. Mapas de dispersión de contaminantes (SO₂, H₂S, HCHO, COV) en la zona, destacando periodos con episodios críticos de contaminación horaria y la mayor (o menor) capacidad del modelo de dispersión para representarlos. Análisis de sensibilidad de cómo modelar las emisiones fugitivas de la nave de la fundición de cobre.

3 Alcances

El Informe considera exclusivamente labores de oficina, no incluye visitas a terreno ni otras actividades.

El Cliente proporcionará los siguientes antecedentes al Consultor:

- a) Información disponible de emisiones de SO₂ y COV.
- b) Información meteorológica de la zona, ojalá con estaciones de monitoreo que complementen las mediciones disponibles en dominio público (SINCA).

El Consultor propondrá 3 CV de potenciales revisores externos para todo el proyecto; el cliente decide la persona que finalmente será el revisor externo. Los honorarios de este revisor forman parte de los costos de la presente asesoría.



4 Metodología y plan de trabajo

4.1 Plan de Trabajo

El Plan de trabajo considera las siguientes actividades:

- a) Estimación y compilación de las emisiones de COV, H₂S, HCHO y SO₂, con resolución horaria.
- b) Configuración de la información meteorológica y ejecución del procesador meteorológico CALMET.
- c) Evaluación del desempeño del modelo CALPUFF, usando SO₂ como gas a modelar.
- d) Modelación de la dispersión de emisiones de COV aromáticos, HCHO y H₂S mediante CALPUFF.
- e) Generación de una descripción técnica (pero accesible) de cómo opera el modelo CALPUFF (principales supuestos) y cómo maneja los distintos tipos de fuentes emisoras (chimeneas, fuentes de área, fuentes de línea).
- f) Producto: informe técnico con todos los resultados y conclusiones de la asesoría; respaldos digitales de modelaciones y de mapas de contaminación (kmz, shp).

4.2 Metodología

La metodología propuesta incluye las siguientes actividades:

- a) Compilación de emisiones horarias de SO₂. Para las termoeléctricas, esa información ya está disponible del monitoreo CEMS de dichas fuentes. Para el caso de la fundición Ventanas, las emisiones por la chimenea principal se van a asumir constantes en cada mes (de acuerdo con el balance de masas generado con esa frecuencia). Para las emisiones fugitivas de SO₂ de la nave de la fundición Ventanas, ellas se van a modelar como fuente boyante de línea, tal como se recomienda en la Guía del Usuario del modelo CALPUFF. Para la chimenea de la planta de ácido se cuenta con emisiones medidas con CEMS.
- b) Estimación de las emisiones de COV. Para el caso de emisiones de COV de los estanques separadores API de ENAP, la metodología corresponde a la recomendada por la Environmental Protection Agency de EEUU³, usando la planilla: "Refinery wastewater emissions tool 2011.xls". Las estimaciones consisten en los flujos evaporativos de cada compuesto considerado en el análisis de COV aromáticos: benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX). Para las

³ Fuente: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/emissions-estimation-protocol-petroleum-refineries>



- estimaciones de emisiones de COV desde estanques de almacenamiento de combustibles se usa la metodología TANKS de la EPA-EEUU.
- c) Estimación de las emisiones de H₂S. En este caso, para estimar las emisiones evaporativas de este compuesto, se va a usar información de mediciones de contenido de H₂S en estanques de crudo de ENAP en fechas cercanas al episodio del 21 de agosto de 2018, junto con la planilla de cálculo mencionada en b).
 - d) Estimación de las emisiones de formaldehído (HCHO), asociado a una operación de abatimiento de emisiones de H₂S provenientes del almacenamiento de petróleo crudo. Para esto se va a emplear información técnica respecto a la solubilidad del HCHO en agua junto a la planilla de cálculo mencionada en b).
 - e) Compilación y depurado de la base de datos de mediciones meteorológicas disponibles en la zona de modelación, para ser ingresadas al modelo meteorológico CALMET. Uso de información meteorológica en altura en la forma de un radiosondeo 'virtual' tomado del re-análisis meteorológico global de NCAR/NCEP para la zona de Quintero⁴.
 - f) Modelación de campos de viento y temperatura empleando el modelo CALMET en modo 'solo observaciones'. Se aplicará una resolución espacial de 250 m, para mejorar la representación del uso de suelos en la zona modelada, resolver adecuadamente el borde costero, etc. Se usará la base de datos de usos de suelo del Instituto Geográfico Militar para construir dicha representación en la zona modelada.
 - g) Modelación de la dispersión de las emisiones de COV, H₂S, HCHO y SO₂ en dicha zona de estudio usando el modelo CALPUFF. Análisis del desempeño de las modelaciones, empleando indicadores cuantitativos (sesgo, error absoluto medio, RMSE, etc.). Para esto último se va a emplear el software R y el paquete *openair*.
 - h) Descripción de la operación del modelo CALPUFF, principales supuestos, cómo modela los distintos tipos de fuentes de emisión.
 - i) Generación de informe técnico con el análisis de los resultados de la asesoría.
 - j) Respalos digitales de la información solicitada, como está detallado en la sección 2.1 de este Propuesta.

⁴ Este tipo de información se genera mediante la aplicación de modelos globales del tiempo, los cuales incorporan toda la información meteorológica global disponible, y poseen una resolución espacial de 0,5° en ambas direcciones horizontales. Fuente: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds094.0/#!description>



5 Compilación y análisis de la meteorología en la zona de Quintero-Puchuncaví

5.1 Escenario de meteorología para el modelo CALPUFF.

El objetivo principal del estudio consiste en simular la dispersión de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) en la zona de Quintero-Puchuncaví, a fin de poder analizar eventos de altas concentraciones ambientales, es decir, situaciones de corto plazo, que se originan, desarrollan y disipan en pocas horas. Debido a esto, se debe contar con un escenario de modelación donde la meteorología de la zona sea representada con la mejor fidelidad posible. En el marco de esta asesoría, se decidió generar un escenario de meteorología construido con la aplicación del modelo CALMET, como se describe a continuación. El escenario meteorológico fue desarrollado por el Consultor, y consiste en generar el archivo meteorológico CALMET.DAT a partir de observaciones de meteorología superficial disponibles en la zona, más un radiosondeo 'virtual' construido a partir del re-análisis meteorológico global de NCAR/NCEP para la zona de Quintero⁵. El periodo modelado corresponde al año 2018 completo. El dominio espacial comprende toda la zona de Quintero-Puchuncaví, por lo que tiene una extensión de 15 x 15 km², sin embargo, tiene una resolución horizontal de 250 m, de manera de incluir en más detalle la variabilidad espacial de usos de suelo en la zona⁶. La siguiente Figura muestra el dominio espacial, junto con las estaciones de meteorología con información disponible en el SINCA (<https://sinca.mma.gob.cl/>) que fueron empleadas en generar el archivo CALMET.DAT.

La siguiente Tabla muestra las coordenadas UTM de las nueve estaciones superficiales SINCA empleadas en la generación de la meteorología en CALMET. A estas nueve estaciones se le añadió la información de cobertura de nubes y altura de techo de nubes (ambas requeridas por CALMET), la cual se obtuvo de la estación de la base aérea de Concón (código SCVM, 32° 57' S, 71° 29' W), a través de una página de búsqueda de información meteorológica (www.ogimet.com).

Las estaciones de monitoreo SINCA también se definieron como receptores discretos, de manera de poder calcular allí las concentraciones modeladas para el caso del SO₂, contaminante que se utiliza

⁵ Este tipo de información se genera mediante la aplicación de modelos globales del tiempo, y poseen una resolución espacial de 0,5° en ambas direcciones horizontales. Fuente:

<https://rda.ucar.edu/datasets/ds094.0/#!description>

⁶ Normalmente se ocupa una resolución espacial de 1 km en modelaciones de calidad del aire, este es el estándar recomendado por la Guía de uso de modelos de dispersión en el SEIA, desarrollada por el SEA:

https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration_files/guias/Guia_uso_modelo_calidad_del_aire_seia.pdf.

para evaluar el desempeño de la modelación realizada con el modelo CALPUFF. Para esto se compara la concentración modelada con la observada en aquellas estaciones más cercanas a la zona de Quintero: Los Maitenes, Quintero y Centro Quintero.

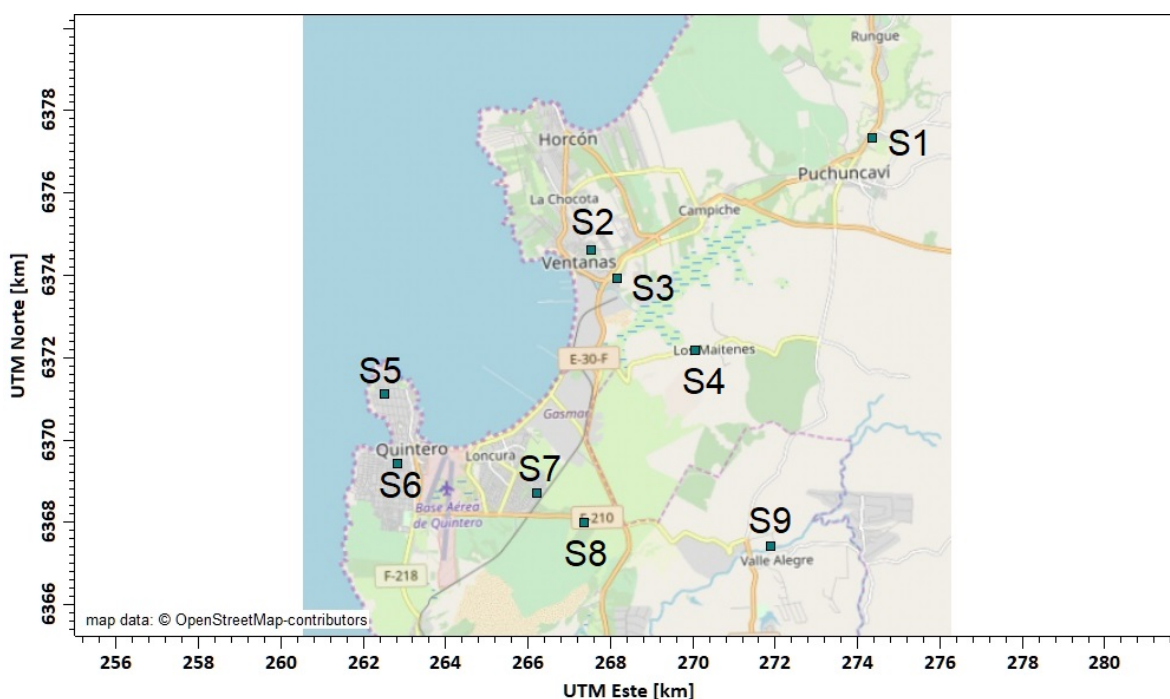


Figura 1 Dominio de modelación para zona Quintero-Puchuncaví, con resolución horizontal de 250 m.

Tabla 1 Coordenadas de las estaciones de meteorología superficial y calidad del aire SINCA en la zona de estudio.

Código y nombre de la Estación SINCA	Coordenadas UTM (WGS-84, 19 S)	
	E (km)	S (km)
S1: Puchuncaví	274.379	6.377.331
S2: Ventanas	267.547	6.374.609
S3: La Greda	268.185	6.373.910
S4: Los Maitenes	270.073	6.372.171
S5: Quintero	262.526	6.371.090
S6: Centro Quintero	262.853	6.369.407
S7: Loncura	266.226	6.368.689
S8: Sur	267.382	6.367.993
S9: Valle Alegre	271.889	6.367.413

5.2 Análisis de la meteorología en el periodo 15 – 26 agosto 2018.

En esta sección presentamos un análisis de la meteorología observada (en superficie y en altura) para el periodo 15-26 de agosto 2018, con el fin de evaluar la variabilidad temporal de estas condiciones en la zona de Quintero-Puchuncaví y evaluarlas específicamente para el episodio ocurrido en Quintero entre los días 21 y 23 de agosto.

5.2.1 Intensidad de los vientos superficiales

Las siguientes figuras muestran líneas de tiempo de las magnitudes de la velocidad del viento, para las nueve estaciones de monitoreo SINCA consideradas en el escenario meteorológico del modelo de dispersión (ver Tabla anterior). Se aprecia en todos los casos que, a partir del 20 de agosto, a contar de la medianoche, las velocidades del viento se redujeron en magnitud, con valores entre los más bajos registrados en todo el periodo analizado.

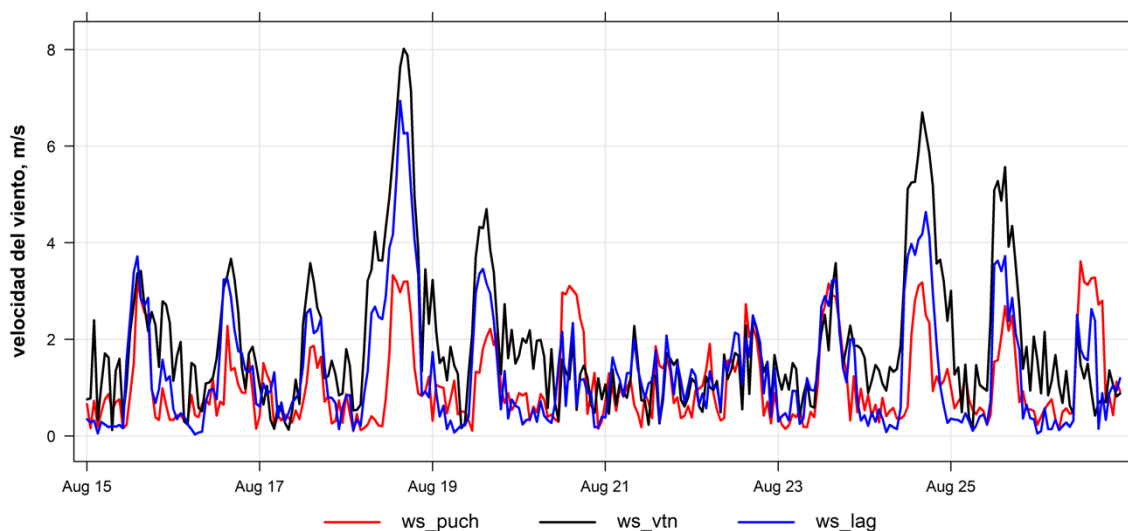


Figura 2 Magnitud del viento (m/s) en las estaciones Puchuncaví, Ventanas y La Greda, 15 – 26 agosto 2018.

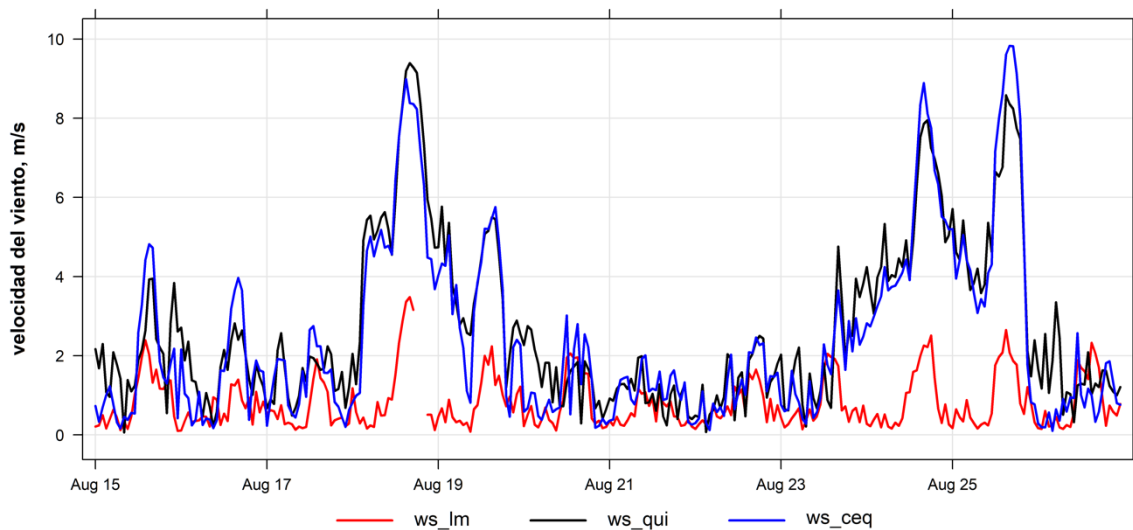


Figura 3 Magnitud del viento (m/s) en las estaciones Los Maitenes, Quintero y Centro Quintero, 15 – 26 agosto 2018.

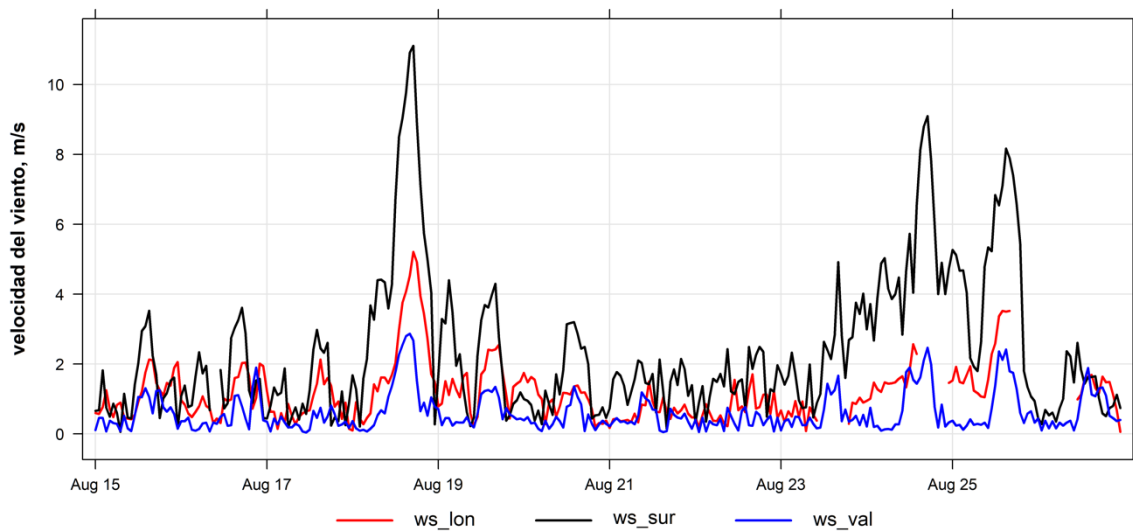


Figura 4 Magnitud del viento (m/s) en las estaciones Loncura, Sur y Valle Alegre, 15 – 26 agosto 2018.

5.2.2 Direcciones de los vientos superficiales

La siguiente figura muestra las direcciones de los vientos⁷ medidos en superficie, para el día 21 de agosto de 2018 en las estaciones Ventanas, La Greda, Quintero y Centro Quintero, es decir, aquellas más cercanas al borde costero en la zona de estudio. Se aprecia que el viento, que a la medianoche tenía direcciones entre 100 y 150°, va rotando contra el sentido del reloj a medida que amanece; en las estaciones en Quintero el viento tiene dirección de 50° a las 9 am, es decir, que transportaba emisiones desde la zona industrial del borde costero de Quintero-Puchuncaví hacia la ciudad de Quintero. Esta condición se mantiene hasta el mediodía, cuando el viento cambia a viento NNW y se mantiene en esas condiciones por el resto de la tarde hasta las 6 pm; más tarde, el viento tiene una dirección entre 100 y 150°.

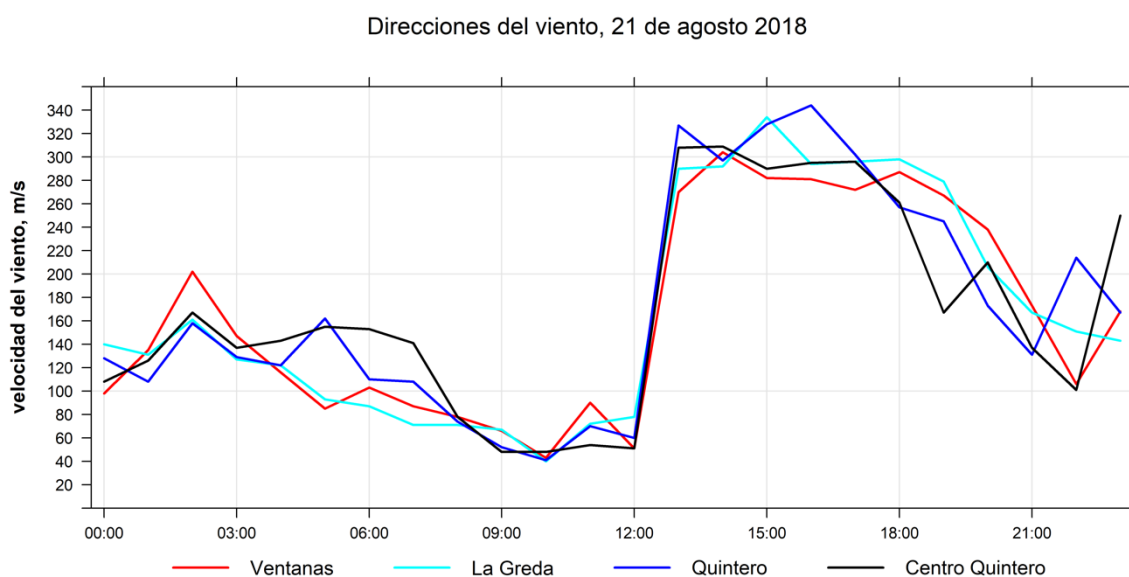


Figura 5 Direcciones del viento en estaciones costeras para el 21 de agosto de 2018.

⁷ La convención es que un viento que sopla desde el norte tiene una dirección de 360°, mientras que un viento que sopla desde el sur posee una dirección de 180°. Como la dirección es angular, un viento de dirección 0° también representa un viento norte. Asimismo, 90° de dirección corresponde a un viento que sopla desde el este, y 270° de dirección corresponde a un viento que sopla desde el oeste.



5.2.3 Alturas de mezclado modeladas en la zona

La siguiente figura muestra una línea del tiempo de la altura de mezclado que calcula el modelo CALMET para la zona de Quintero entre el 15 y 26 de agosto de 2018. Se aprecia claramente que la modelación estima que la altura de mezclado en los días 20 y 21 de agosto es la más baja modelada en todo el periodo mostrado en la figura. La figura también muestra que hubo una disminución de las alturas de mezclado entre el 18 y 21 de agosto, las que posteriormente volvieron a subir sus valores del 23 al 25 de agosto a valores similares a los del 18 de agosto.

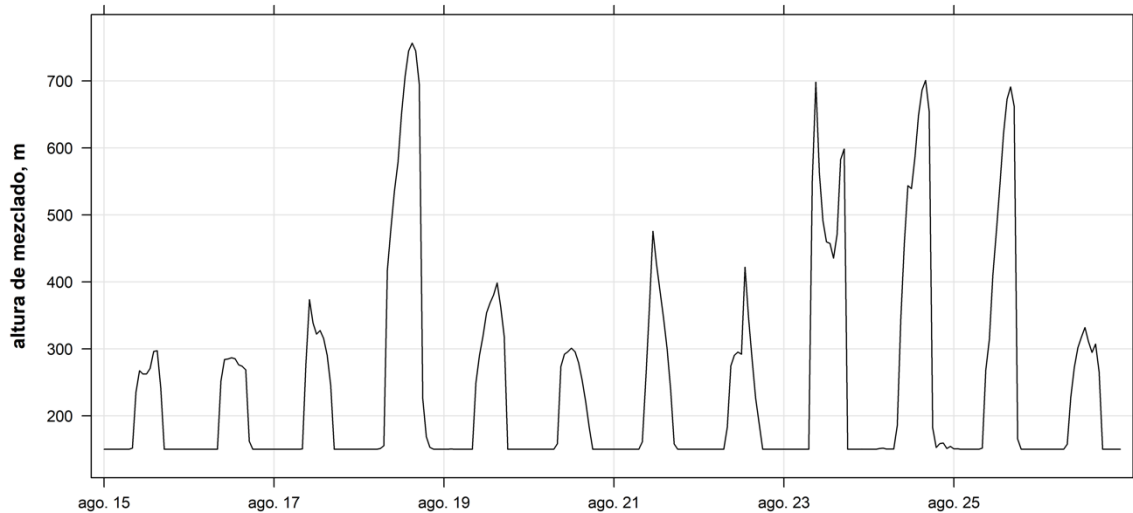


Figura 6 Alturas de mezclado calculadas por el modelo CALMET para la zona de Quintero, 15-26 agosto 2018.

La siguiente Figura muestra que el 21 y 22 de agosto la radiación solar alcanzó niveles mínimos en el periodo analizado, debido a la presencia de nubosidad en toda la zona.

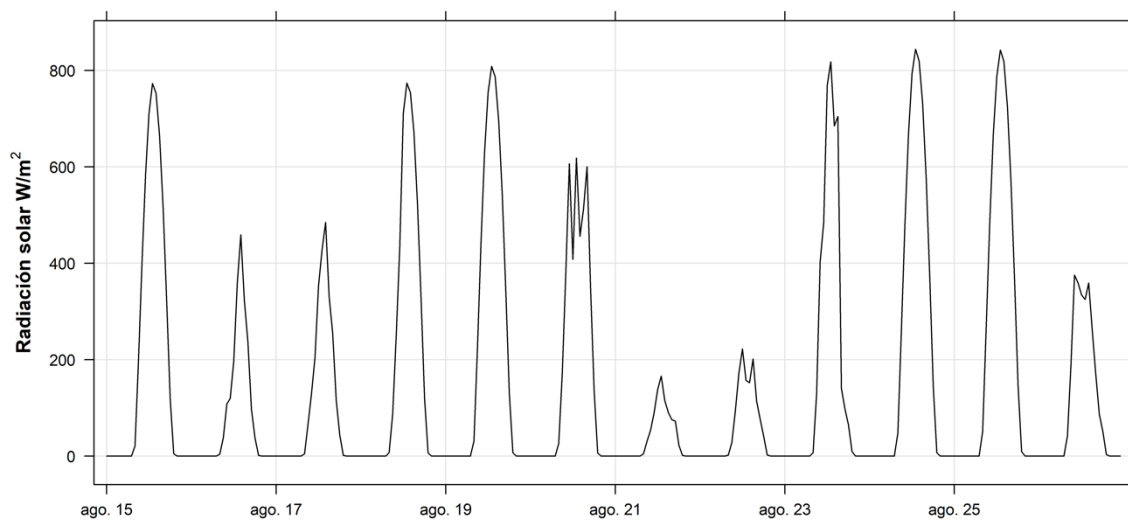


Figura 7 Radiación solar medida en la zona de Quintero (estación meteorológica Principal), 15-26 agosto 2018.

5.2.4 Perfiles verticales de temperatura observada en Santo Domingo

A continuación, se presenta una figura con los perfiles verticales de la temperatura potencial (θ_v) observados en los radiosondeos de las 8 am (hora local) realizados en Santo Domingo, ubicado a 100 km al sur de Quintero. Normalmente en las mañanas se presenta una condición de inversión térmica cerca de la superficie, es decir, la temperatura potencial aumenta con la altura y por lo tanto la pendiente $d\theta_v/dz$ es positiva. A mayor valor de esta pendiente, más estable y estratificada está la atmósfera y, por lo tanto, las emisiones se van a diluir menos en la dirección vertical, causando aumentos de contaminación atmosférica a nivel de superficie.

Se aprecia en la figura que entre el 18 y el 21 de agosto la pendiente $d\theta_v/dz$ aumentó hasta que el día 21 se observa una inversión térmica muy intensa que está ubicada a unos 450 m sobre el nivel del mar; esto implica que la altura de mezclado no va a poder ascender durante el día más allá de esos niveles. El día 22 de agosto se mantiene una fuerte inversión térmica, pero ubicada a unos 800 m sobre el nivel del mar, y el 23 de agosto ya se ha atenuado la inversión térmica y el perfil vertical se asemeja al observado el 18 de agosto.

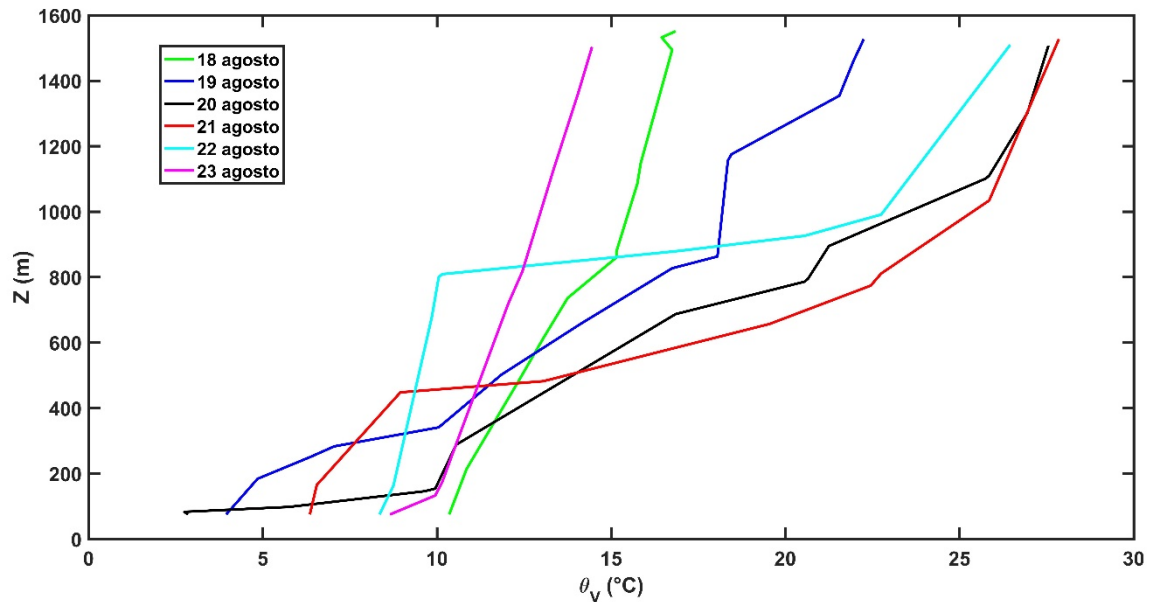


Figura 8 Perfiles verticales de la temperatura potencial del aire θ_v ($^{\circ}\text{C}$). Fuente: radiosondeo de Santo Domingo, disponible en: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

Aunque estas observaciones del radiosondeo fueron hechas en la costa de Santo Domingo, a 100 km al sur de Quintero, los perfiles verticales dan cuenta de movimientos de la atmósfera a escalas de cientos de km, por lo que se puede asumir que estos resultados son válidos para la zona de Quintero también.

En resumen, en esta sección hemos mostrado que las condiciones meteorológicas del 20 al 23 de agosto llevaron a una condición de mala dispersión de las emisiones de la zona industrial de Quintero-Puchuncaví, las que fueron transportadas a la ciudad de Quintero durante las noches y mañanas, con bajas velocidades del viento, baja altura de mezclado vertical y mucha estabilidad atmosférica. Todas estas condiciones en conjunto llevaron a generar un episodio de aumentos de las concentraciones ambientales de todos los contaminantes provenientes de dicha zona industrial.



6 Modelación de calidad del aire para SO₂.

En esta sección se presenta primero un análisis de las observaciones de SO₂ en la zona de estudio. A continuación, se describe como se incluyeron las emisiones de SO₂ para su posterior modelación con el modelo CALPUFF. Finalmente, se compara gráficamente el desempeño de las modelaciones horarias de SO₂, comparándolas con las concentraciones observadas, para todo el año 2018. El objetivo de esta sección es evaluar el desempeño del modelo en comparación a la información de calidad del aire, observada en el periodo de análisis.

6.1 Valores observados de SO₂ en la red SINCA.

En esta sección presentamos las características de las concentraciones de la red de monitoreo de SO₂ disponible en SINCA. Para esto seleccionamos tres de las nueve estaciones de monitoreo disponibles (ya presentadas en la Figura 1): Los Maitenes, Quintero y Centro Quintero, y que son las que están en el área impactada por el episodio de agosto de 2018.

La figura 9 muestra un gráfico de la variabilidad temporal de las concentraciones medidas en esas tres estaciones de monitoreo, para todo el año 2018. Se aprecia que en Los Maitenes se registran los mayores valores de concentraciones al mediodía; en contraste, en Quintero y Centro Quintero, los mayores valores se registran en la noche. La brisa mar-continente explica el alza de concentraciones en Los Maitenes en condiciones diurnas, y la brisa continente-mar aquellos máximos nocturnos medidos en las dos estaciones ubicadas en Quintero. Tampoco se aprecia un ciclo semanal significativo (indicando nuevamente que las fuentes de emisión de SO₂ son continuas), y hay una clara estacionalidad anual, con aumentos de concentraciones entre abril y septiembre (otoño-invierno).

La figura 10 muestra la variación del SO₂ observado en las mismas tres estaciones de monitoreo, pero para la semana del lunes 20 al domingo 26 de agosto de 2018, es decir, la semana en que ocurrió el episodio analizado. Se aprecia que desde el lunes 20 al jueves 23 se mantuvo un patrón de aumento de concentraciones de SO₂ por las noches y mañanas en las dos estaciones de monitoreo en Quintero, lo que indica transporte de masas de aire desde la zona industrial de Ventanas hacia la ciudad de Quintero en esas horas, lo cual es corroborado por la dirección del viento en esos días y horas.



Distribución temporal del SO₂ año 2018

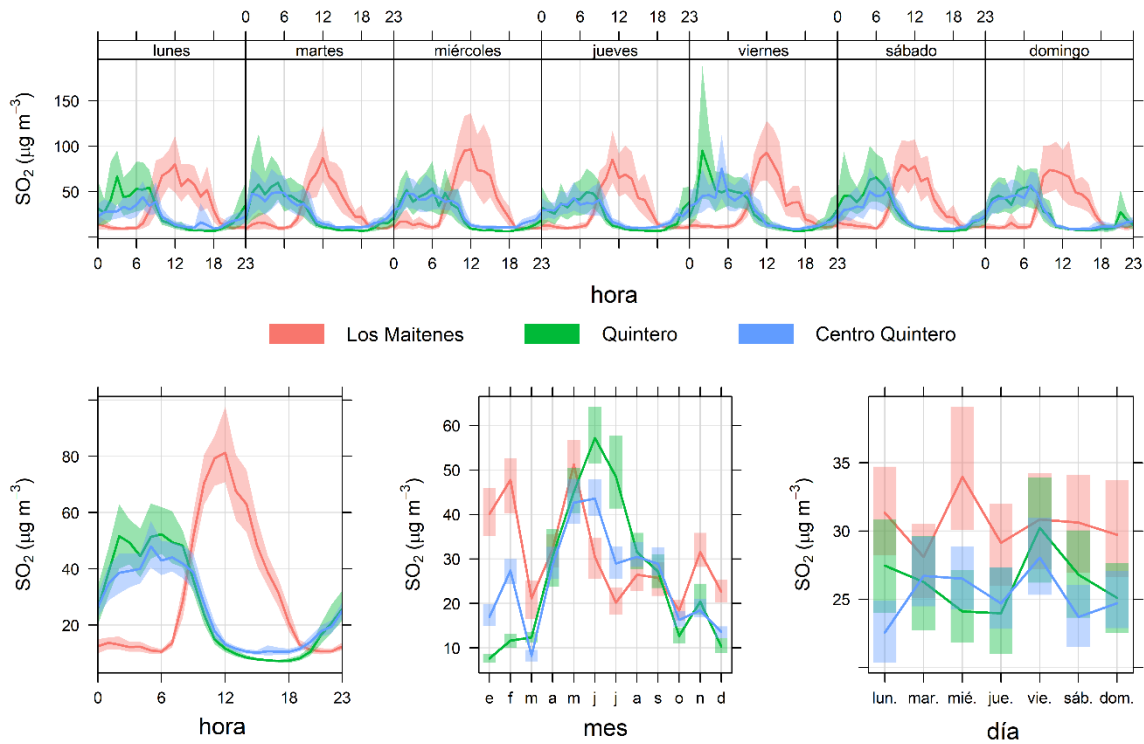


Figura 9 Variabilidad temporal SO₂ observado, zona centro Quintero-Puchuncaví, año 2018 completo.

Distribución temporal del SO₂ 20-26 agosto 2018

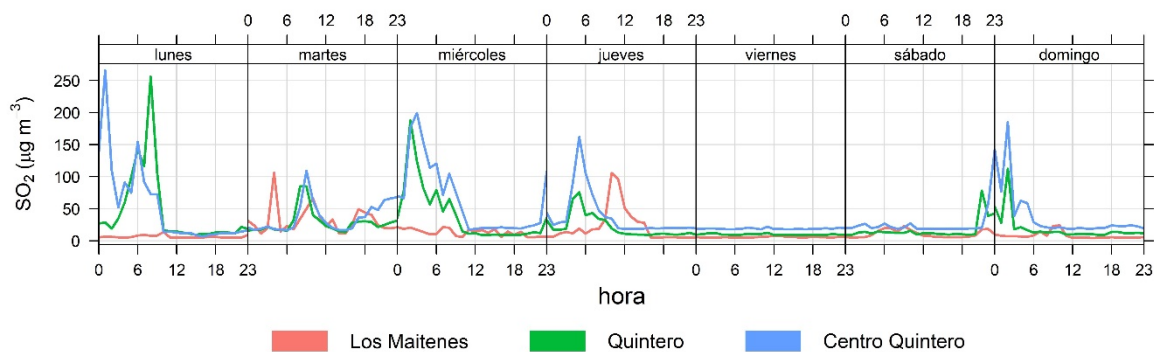


Figura 10 Variabilidad temporal SO₂, zona centro Quintero-Puchuncaví, semana del 20 al 26 de agosto 2018.



6.2 Escenario de emisiones de SO₂

Para realizar la modelación del SO₂ en la zona de estudio, se han considerado las siguientes emisiones de SO₂:

- 1) Emisiones de la chimenea principal de la fundición Codelco Ventanas
- 2) Emisiones del complejo termoeléctrico Ventanas de AES GENER
- 3) Emisiones fugitivas de la nave de la fundición Codelco Ventanas, las cuales se modelaron como fuente de línea boyante, de acuerdo a la recomendación del software CALPUFF
- 4) Emisiones de la chimenea de la planta de ácido de Codelco Ventanas

La siguiente Tabla muestra las emisiones anuales (ton) de SO₂ consideradas en cada fuente.

Tabla 2 Resumen de emisiones de SO₂ consideradas en la modelación.

Fuente emisora	Emisión anual (ton/año)
Chimenea principal de Codelco Ventanas	9.240
Complejo termoeléctrico Ventanas AES GENER	6.440
Emisiones fugitivas de la nave de la fundición Codelco Ventanas	912
Chimenea de la planta de ácido de Codelco Ventanas	475

Cabe hacer notar que todas las emisiones de la tabla anterior son variables en el tiempo. La menor resolución temporal es mensual para las emisiones de la chimenea principal de Codelco Ventanas, ya que ellas se obtienen desde un balance de masa de azufre, hecho a escala mensual. Este aspecto se debe tener presente al momento de evaluar el desempeño del modelo de dispersión, puesto que esas emisiones son las más altas consideradas en la modelación.

Las emisiones horarias del complejo TE Ventanas y las de la planta de ácido de Codelco Ventanas fueron traspasadas por el Cliente. Además, se contaba con información detallada del balance de azufre del mes de agosto de 2018, donde las emisiones fugitivas de la nave de fundición de Codelco Ventanas eran un 92% superior a aquellas descargadas por la chimenea de la planta de ácido. Usando ese factor de 1,92 y asumiendo igual comportamiento para todo el año 2018, fue posible generar estimaciones horarias de las emisiones fugitivas de la nave de fundición, para todo el año 2018. Estas emisiones fugitivas de la nave de la fundición Codelco Ventanas fueron modeladas suponiendo que la nave es una fuente de emisión de línea con boyancia, como se recomienda en la Guía del usuario del modelo CALPUFF.



6.3 Evaluación del desempeño de las modelaciones de SO₂

En esta sección presentamos los resultados de modelar todas las fuentes de SO₂ en la zona, y comparar dicha simulación con las observaciones de las tres estaciones de monitoreo en la zona impactada por el episodio del 21 al 23 de agosto 2018: Los Maitenes, Quintero y Centro Quintero. En primer lugar, presentamos una comparación cualitativa (gráfica) y posteriormente realizamos una comparación estadística (cuantitativa), empleando indicadores de evaluación de modelos de dispersión.

Cabe hacer notar que, cuando se trata de modelaciones horarias de emisiones provenientes en su mayoría de chimeneas, las comparaciones entre observaciones y modelaciones se deben realizar en forma estadística, ya que todos los modelos de dispersión poseen una incertidumbre inherente⁸. Esto se debe a que las observaciones empleadas en el modelo (velocidad del viento, altura de mezclado, etc.) no describen completamente la turbulencia atmosférica (en particular la estabilidad atmosférica), y por esto los modelos usan expresiones empíricas para representar la dispersión desde una fuente como una chimenea. Dichas expresiones empíricas se han obtenido en experimentos realizados en terreno plano y sin obstáculos como colinas o cambios de uso de suelo como es el caso del borde costero. Por esto, se pueden presentar discrepancias entre lo que asume el modelo y lo que efectivamente ocurre en una hora dada en la zona modelada. Además, no todas las emisiones se conocen completamente en forma horaria, como ya se ha comentado en la sección anterior, lo que también añade incertidumbre en las modelaciones.

Luego, los modelos de dispersión se comparan para un gran conjunto de datos (un año de datos horarios, por ejemplo), ya que en periodos cortos la citada limitación física de los modelos puede producir una variabilidad en concentraciones modeladas de hasta $\pm 50\%$ (fuente: referencia citada al pie de esta página).

⁸ 40 CFR Part 51 Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and Other Revisions; Final Rule. Federal Register / Vol. 70, No. 216 / Wednesday, November 9, 2005 / Rules and Regulations

6.3.1 Distribuciones temporales de las modelaciones de SO₂, año 2018

La siguiente Figura muestra el caso de la estación de monitoreo Los Maitenes, donde se aprecia un desempeño promedio excelente del modelo, especialmente en predecir el perfil diurno de las concentraciones, ya que no hay diferencia significativa entre las concentraciones (promedio) observadas y modeladas entre 6 am y 7 pm (hora local). Esto implica una gran capacidad del modelo para representar condiciones de dispersión diurnas en dicha zona.

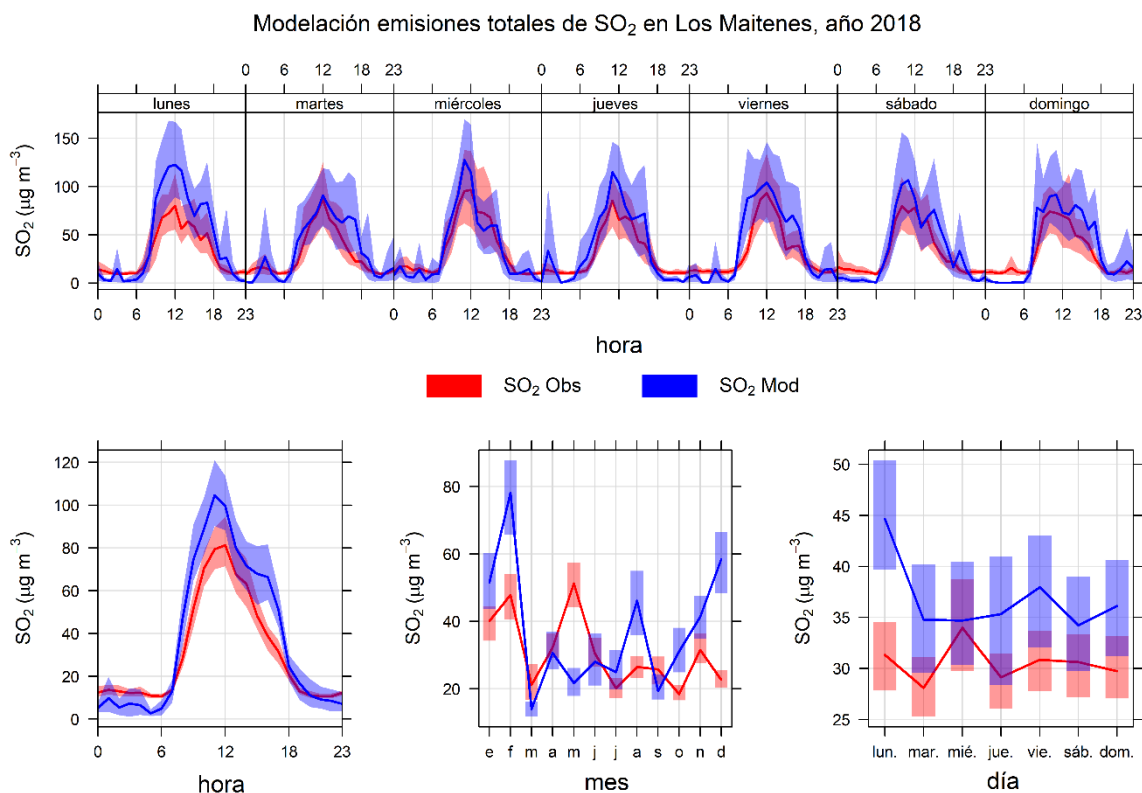


Figura 11 Distribución temporal de las concentraciones horarias de SO₂ observadas (SO₂ Obs) y modeladas en la estación Los Maitenes (SO₂ Mod). Fuentes modeladas: Codelco División Ventanas y Central Termoeléctrica Ventanas. Las líneas representan la media y el área ensombrecida es el intervalo de confianza al 95% para el valor medio.

La siguiente Figura muestra el caso de la estación Quintero, donde se aprecia un buen desempeño del modelo, especialmente por las noches, ya que hay muy buena correlación entre las concentraciones (promedio) observadas y modeladas. Esto implica una buena capacidad del modelo

[Servicio de modelación de calidad del aire para la zona de Quintero-Puchuncaví](#)

Informe Final

Página 25 de 61

Código V01: FI-A.03-DSA

para representar condiciones de dispersión en dicha zona, distinguiendo entre buenas y malas condiciones de dispersión de contaminantes, considerando el transporte de emisiones desde el sector industrial de Ventanas hacia Quintero. Con respecto a la estacionalidad, el modelo subestima las concentraciones en otoño e invierno. Entre el mediodía y las 6 pm, el modelo predice que no hay aportes del complejo industrial Ventanas a las concentraciones en Quintero, y esto se debe a que en esas condiciones ingresan masas de aire desde el sur hacia Quintero, trayendo concentraciones de SO₂ provenientes de fuentes de emisión ubicadas hacia el sur de Quintero y que no han sido modeladas en el presente análisis, que se enfoca al caso de episodios que ocurren en condiciones de viento que llega a Quintero desde la zona norte. Por eso no es realista pedirle buen desempeño al modelo entre el mediodía y las 6 pm.

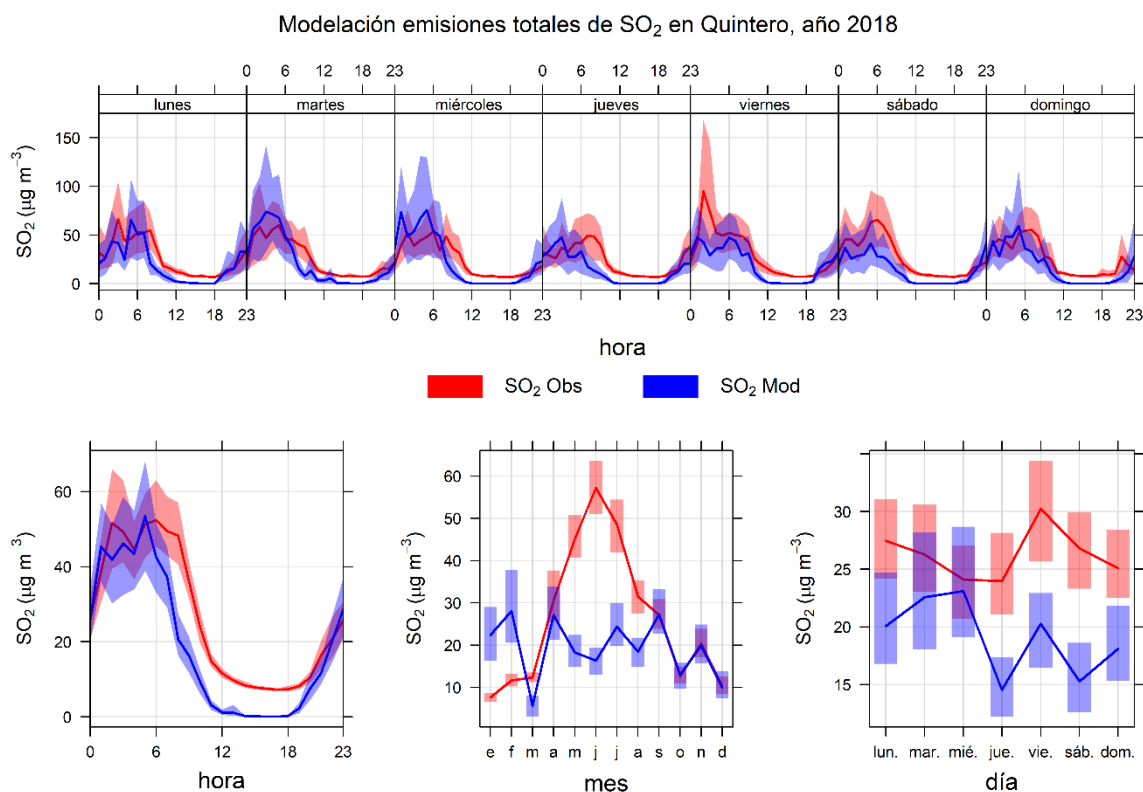


Figura 12 Distribución temporal de las concentraciones horarias de SO₂ observadas (SO₂ Obs) y modeladas en la estación Quintero (SO₂ Mod). Fuentes modeladas: Codelco División Ventanas y Central Termoeléctrica Ventanas. Las líneas representan la media y el área ensombrecida es el intervalo de confianza al 95% para el valor medio.

La siguiente Figura muestra el caso de la estación Centro Quintero, donde se aprecia un desempeño aceptable del modelo, ya que hay buena correlación entre las concentraciones (promedio) observadas y modeladas entre la medianoche y el mediodía. Esto implica una buena capacidad del modelo para representar condiciones de dispersión en dicha zona, distinguiendo entre buenas y malas condiciones de dispersión de contaminantes. Con respecto a la estacionalidad de las modelaciones, éstas subestiman las concentraciones observadas en otoño e invierno. Nuevamente el modelo predice que no hay aportes de las fuentes de SO₂ del sector industrial de Ventanas entre el mediodía y las 6 pm, como ya se ha explicado para el caso de la estación Quintero.

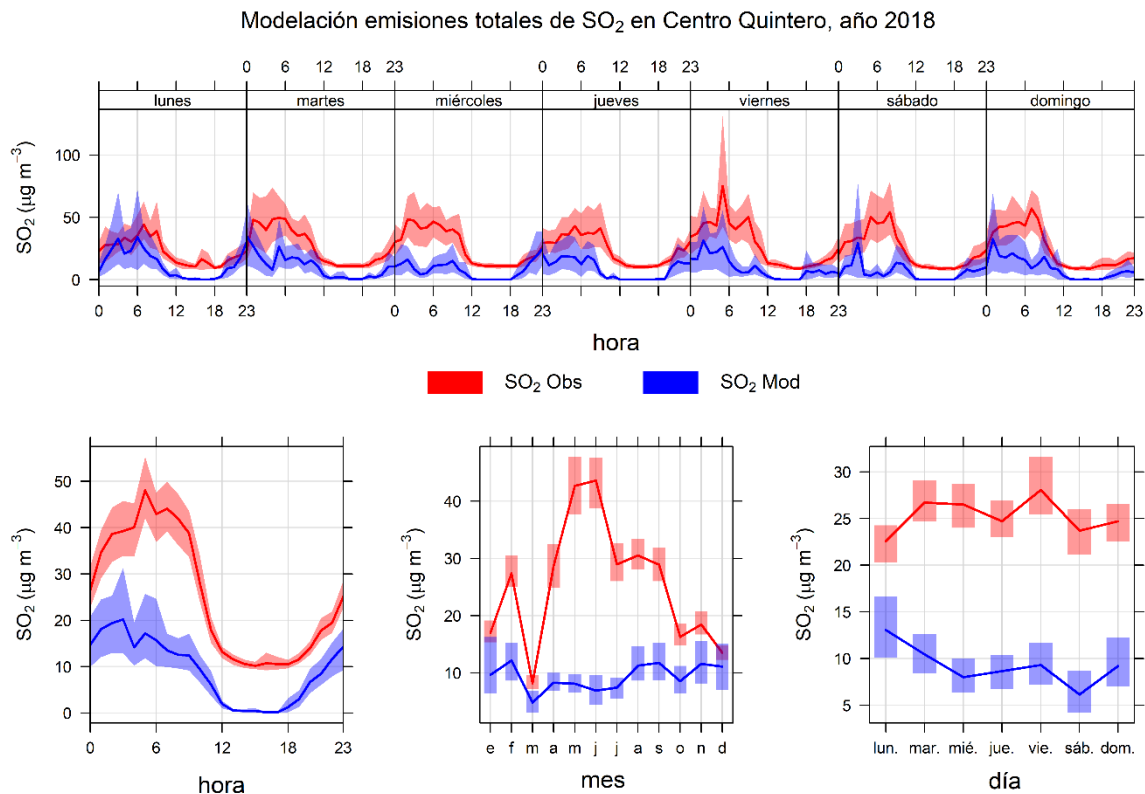


Figura 13 Distribución temporal de las concentraciones horarias de SO₂ observadas (SO₂ Obs) y simuladas en la estación Centro Quintero (SO₂ Mod). Fuentes modeladas: Codelco División Ventanas y Central Termoeléctrica Ventanas. Las líneas representan la media y el área ensombrecida es el intervalo de confianza al 95% para el valor medio.



En resumen, en esta sección se ha mostrado que el modelo de dispersión es capaz de representar la variabilidad temporal de las concentraciones de SO_2 en las estaciones más cercanas al borde costero de la zona Quintero-Puchuncaví, especialmente en el caso de la ciudad de Quintero y en condiciones nocturnas y de madrugada.

6.3.2 Distribuciones temporales de las modelaciones de SO_2 , 21-23 de agosto 2018 para Quintero

En esta sección presentamos los resultados de las modelaciones horarias de SO_2 , para el periodo del 21 al 23 de agosto 2018, para visualizar el desempeño del modelo de dispersión, en el caso de la zona de Quintero, donde se reportaron efectos en salud en el citado episodio de agosto 2018.

Las siguientes figuras muestran el desempeño del modelo de dispersión en la estación de monitoreo Quintero y Centro Quintero; en ambos casos el modelo predice máximos de concentraciones en la mañana del 21 y 22 de agosto, así como en la medianoche y madrugada del 23 de agosto. Lo importante es que se está capturando el transporte de emisiones desde la zona industrial hacia Quintero, en los tres días considerados en el análisis.

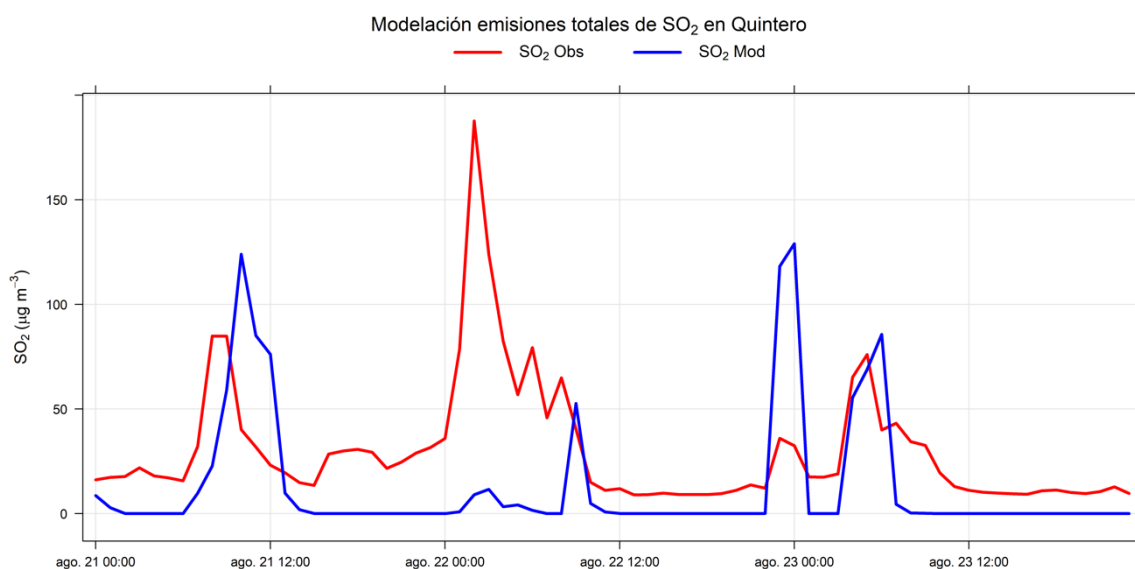


Figura 14 Desempeño del modelo de dispersión en la estación Quintero, 21 al 23 de agosto 2018.

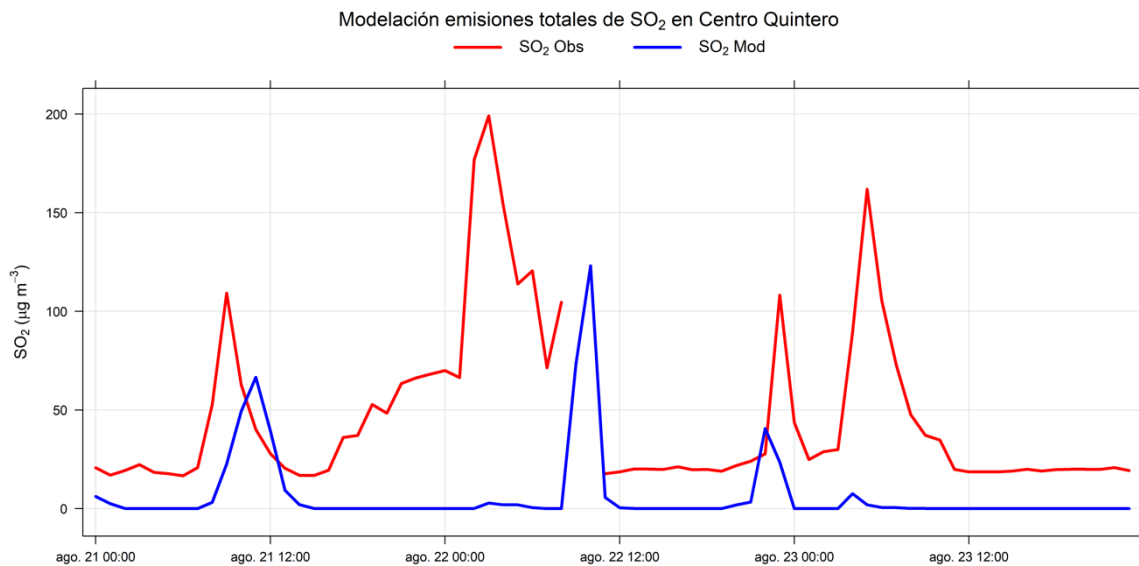


Figura 15 Desempeño del modelo dispersión en la estación Centro Quintero, 21 al 23 de agosto 2018.

En resumen, al realizar una comparación de los valores horarios de SO₂ observados en la red de monitoreo con los valores modelados en la zona de Quintero, se aprecia que el modelo es capaz de representar el alza de concentraciones en las mañanas, con un máximo al mediodía y un descenso rápido en la tarde, para la zona de Quintero. Además, entre el mediodía y las 6 pm, el modelo predice concentraciones muy bajas de SO₂, lo que concuerda con las observaciones de la red de monitoreo. Sin embargo, el modelo subestima las concentraciones entre el mediodía y las 6 pm, probablemente porque hay ingreso de SO₂ desde la zona al sur de Quintero, y esto está asociado a emisiones de SO₂ que no se modelan, por estar fuera del dominio modelado (Figura 1). Parte de la discrepancia entre observaciones y modelaciones horarias se puede atribuir a que se asume una emisión constante en la chimenea principal de la fundición de Codelco, puesto que no se conoce en forma horaria esta emisión relevante modelada.

Cabe hacer notar que en esos tres días considerados (21 al 23 de agosto), el SO₂ no superó la norma horaria de 350 µg/m³ en ningún momento; tampoco se superó la norma OMS de 500 µg/m³ como promedio de 10 minutos.



6.3.3 Análisis estadístico de la modelación de SO₂

En esta sección presentamos una evaluación cuantitativa de las modelaciones de SO₂, evaluando el desempeño del modelo de dispersión CALPUFF en las estaciones de monitoreo Quintero y Centro Quintero.

Para poder comparar los valores modelados con los observados en forma cuantitativa, se calculan los siguientes indicadores estadísticos⁹. En las siguientes definiciones, O_i representa el i -ésimo valor horario observado y M_i representa el i -ésimo valor horario modelado, para un total de n observaciones horarias.

Sesgo promedio (MB)

El sesgo promedio proporciona una buena indicación si el modelo sobre- o sub- estima las observaciones, dependiendo si su signo es positivo o negativo, respectivamente.

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N M_i - O_i$$

Sesgo medio normalizado (NMB)

El sesgo de la media es normalizado dividiendo por el valor observado.

$$NMB = \frac{\sum_{i=1}^n M_i - O_i}{\sum_{i=1}^n O_i}$$

Error cuadrático medio (RMSE)

Tiende a estar dominado por las mayores discrepancias entre observaciones y modelaciones (eventos extremos, por ejemplo)

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{n} \right)^{1/2}$$

⁹ Fuente: Fuente: Guidance Document on Modelling Quality Objectives and Benchmarking, FAIRMODE, The Forum for Air quality Modeling. Febrero 2017. Disponible en: https://fairmode.jrc.ec.europa.eu/document/fairmode/WG1/Guidance_MQO_Bench_vs2.1.pdf



Coefficiente de correlación (r)

El coeficiente de correlación de Pearson es una medida de la relación lineal entre dos variables.

$$r = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_i - \bar{M}}{\sigma_M} \right) \left(\frac{O_i - \bar{O}}{\sigma_O} \right)$$

Sesgo Fraccional (FB)

Este indicador expresa el sesgo normalizado por el promedio entre lo observado y lo modelado¹⁰.

$$FB = 2 \cdot \left(\frac{\bar{M} - \bar{O}}{\bar{M} + \bar{O}} \right)$$

Para considerar qué criterio de aceptabilidad se debería tomar, hay que tener presente que todo modelo de dispersión hace una simplificación del proceso de transporte turbulento en la atmósfera. Existe una variabilidad inherente en los datos horarios de concentraciones en un sitio dado, causada por la turbulencia del campo de vientos¹¹. Además de esta incertidumbre aleatoria, existe una incertidumbre sistemática, la que depende de: i) datos de entrada al modelo de dispersión (emisiones, meteorología), ii) errores en las concentraciones monitoreadas, iii) incertidumbres en la formulación del modelo de dispersión (supuestos). Esta combinación de incertidumbre hace que las máximas concentraciones a nivel del suelo asociadas a fuentes puntuales (chimeneas) también poseen típicamente errores de hasta un 50%¹¹.

Estas fuentes de incertidumbre hacen que al comparar hora a hora en un sitio dado las predicciones del modelo con las concentraciones observadas, se aprecia una baja correlación, como se ha mostrado en las figuras de la sección 6.3.2. Luego, normalmente los modelos para concentraciones horarias no se evalúan en condiciones de corto plazo, sino más bien de largo plazo, cuando la gran cantidad de datos considerados reduce las fuentes de incertidumbre arriba mencionadas.

¹⁰ Fuente: Hanna and Chang, Acceptance criteria for urban dispersion model evaluation, Meteorol. Atmos. Phys. 116, 133-146, 2012

¹¹ Fuente: 40 CFR Part 51 Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and Other Revisions; Final Rule. Federal Register / Vol. 70, No. 216 / Wednesday, November 9, 2005 / Rules and Regulations



De acuerdo con los resultados gráficos mostrados y comentados en la sección 6.3.1, los mejores desempeños en las estaciones de monitoreo Quintero y Centro Quintero se presentan en la noche, madrugada y antes del mediodía.

La siguiente Tabla muestra la evaluación del desempeño de la modelación realizada para el SO_2 , para todo el año 2018, pero en distintos periodos del día, como se explica en el párrafo anterior: todas las estaciones se evalúan en cuatro periodos: medianoche a 5 am, 6 a 11 am, mediodía a 5 pm y 6 a 11 pm.

Se aprecia que en las estaciones Los Maitenes y Quintero las modelaciones satisfacen el criterio¹¹ de $|NMB| < 0,5$ que indica que en promedio las concentraciones modeladas están dentro de $\pm 50\%$ de las concentraciones observadas (la excepción es el caso de la estación Quintero por las tardes, aspecto que ya se ha explicado anteriormente).

Además, aplicando el criterio de aceptación¹⁰ de que $|FB| < 0,3$ se concluye que las estaciones Los Maitenes (6 am a medianoche) y Quintero (6 pm a 5 am) cumplen con este criterio también. Además, entre 6 y 11 am en Quintero se alcanza el valor de $r=0,35$, el cual es el mayor valor de r registrado en la Tabla 3.

Tabla 3. Evaluación estadística del desempeño de las modelaciones, año 2018.

Estación	Horas	n	MB	NMB	RMSE	r	\bar{O}	\bar{M}	FB
Los Maitenes	0 a 5	2096	-6,27	-0,50	59,54	0,15	12,45	6,1	-0,68
Quintero		2092	-0,95	-0,02	131,36	0,22	44,34	43,4	-0,02
C. Quintero		2089	-20,90	-0,55	85,46	0,11	38,3	17,4	-0,75
Los Maitenes	6 a 11	2128	13,45	0,32	125,37	0,25	42	55,5	0,28
Quintero		2178	-15,97	-0,43	75,37	0,35	37,5	21,5	-0,54
C. Quintero		2143	-24,10	-0,68	68,41	0,10	35,6	11,6	-1,02
Los Maitenes	12 a 17	2169	18,16	0,33	147,04	0,18	55,1	72,8	0,28
Quintero		2119	-8,26	-0,95	12,59	0,22	8,7	0,5	-1,78
C. Quintero		2137	-10,54	-0,95	17,09	0,10	11,1	0,6	-1,79
Los Maitenes	18 a 23	2274	-0,43	-0,03	58,47	0,27	13,1	12,6	-0,04
Quintero		2272	-2,83	-0,19	56,31	0,24	15,2	12,4	-0,20
C. Quintero		2267	-8,89	-0,53	37,46	0,20	16,7	7,9	-0,72



Cabe hacer notar que la modelación de SO_2 está muy dominada (en las noches y antes del mediodía¹²) por las emisiones de la chimenea principal de la refinería Codelco División Ventanas, las que no se conocen con resolución horaria, solamente a escala mensual. Por lo tanto, esta incertidumbre en las emisiones horarias de SO_2 está claramente perjudicando en parte los indicadores de desempeño del modelo de dispersión que se muestran en la Tabla anterior. No es posible estimar la magnitud de este efecto dado que justamente no se conocen dichas emisiones con resolución horaria. Sin embargo, al considerar todos los datos del año 2018, se asume que dicho efecto se reduce, tal como se recomienda en la evaluación de modelos de calidad del aire en EEUU⁹.

En conclusión, los indicadores estadísticos de desempeño de modelos de dispersión indican que las modelaciones en las estaciones Los Maitenes y Quintero cumplen con los criterios de aceptabilidad recomendados por la literatura técnica^{7,8}. En particular, el modelo CALPUFF tiene un desempeño aceptable entre 6 pm y mediodía en la zona de Quintero.

¹² A esas horas, los vientos son de dirección este, noreste y norte, transportando masas de aire desde el sector industrial hacia la zona de Quintero.

7 Modelaciones de las emisiones de estanques API de ENAP

En esta sección se presentan los resultados de modelar las emisiones de COV, HCHO y H₂S de los separadores API de ENAP (ubicados en la zona de Loncura). En estos separadores API se hizo el drenado de las aguas decantadas provenientes del estanque de almacenamiento de petróleo crudo T5111; este proceso comenzó el 17 de agosto de 2018 y se prolongó hasta el 18 de agosto; luego se drenó el agua decantada del estanque de almacenamiento de crudo T5106 el 19 de agosto; finalmente, hubo descarga de aguas provenientes de pruebas hidrostáticas y agua con restos de crudo al API, asociada a la mantención de los estanques T5109 y T5104¹³. La ubicación de las fuentes emisoras de COV se muestra en la siguiente figura. El periodo de modelación se extiende desde el 17 al 26 de agosto de 2018.

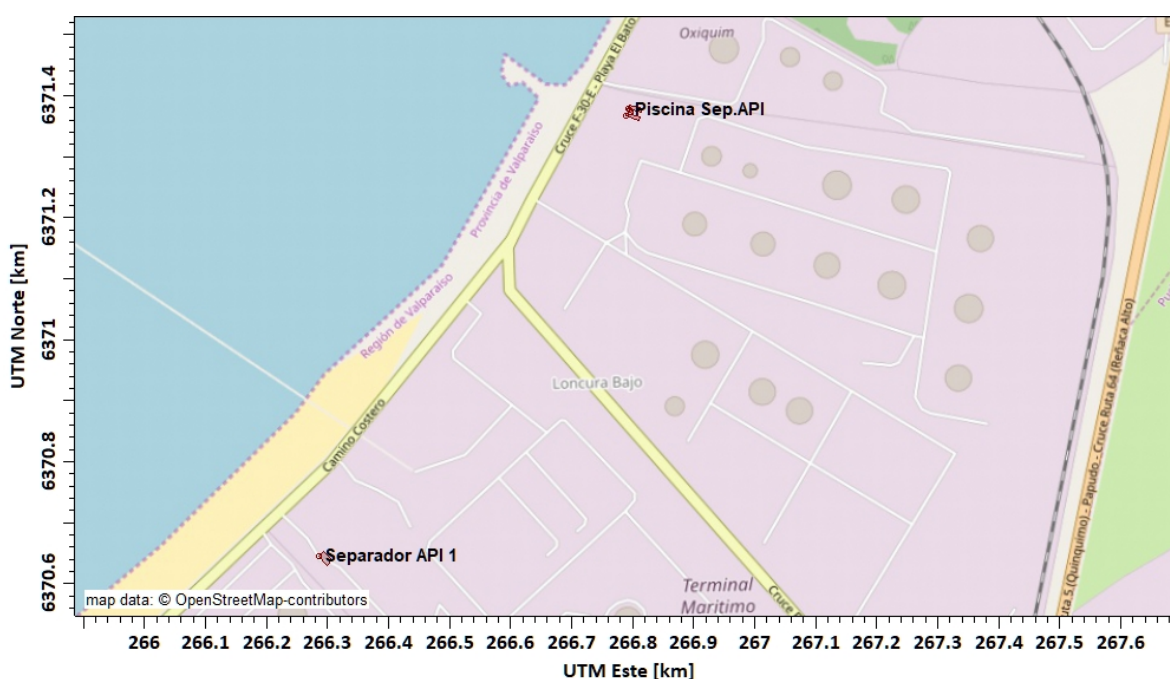


Figura 16 Ubicación de los separadores API considerados en la modelación de las emisiones fugitivas de COV de ENAP.

Se consideran las emisiones de los siguientes compuestos aromáticos: benceno, tolueno, xileno y etilbenceno. También se modelan las emisiones de sulfuro de hidrógeno (H₂S), presente en el crudo almacenado en los estanques de ENAP, así como las emisiones del formaldehído (HCHO), elemento

¹³ Fuente: Anexo 5 de la presentación ENAP de fecha 17 de diciembre de 2019.



químico que se usa normalmente como agente secuestrante del H₂S, de manera de reducir el contenido de H₂S en el crudo. Tanto el H₂S como el HCHO se encuentran presentes en la fase acuosa decantada en los estanques de almacenamiento de crudo de ENAP, la que fue trasvasijada a los separadores API de ENAP a partir del 17 de agosto, como ya se ha detallado al comienzo de esta sección del Informe.

7.1 Estimación de las emisiones evaporativas de los separadores API de ENAP.

7.1.1 Uso de la metodología EPA-EEUU.

El protocolo de estimación de emisiones¹⁴ de la Agencia de Protección Ambiental de EEUU (EPA) explica cómo se realiza el cálculo de las emisiones por evaporación al aire de componentes presentes en la fase acuosa de los estanques separadores API.

La metodología que se emplea está basada en el cálculo del flux de transferencia de masa desde el líquido al aire, y consiste en el uso de una planilla de cálculo que permite ingresar las características de un estanque de separación API (superficie), las condiciones de temperatura ambiental, y las propiedades físico-químicas de los compuestos cuyas emisiones se modelan.

Las ecuaciones de cálculo de emisiones corresponden a las ecuaciones (B-21) a (B-27) en el Anexo B del documento¹³: *Emissions Estimation Protocol for Petroleum Refineries*, Versión 3, Abril 2015, Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711.

En dichas ecuaciones aparecen como información de entrada las concentraciones de los compuestos en la fase acuosa de los separadores API, aspecto que se presenta a continuación.

7.1.2 Estimación de las concentraciones de COV en la fase acuosa de los separadores API de ENAP.

En el análisis descrito en la sección anterior, la tasa de emisión de compuestos depende de las concentraciones de ellos en la fase acuosa. En esta sección entregaremos los detalles de la estimación de las concentraciones de COV aromáticos, HCHO y H₂S en los estanques API para el periodo del 17 al 27 de agosto de 2018, enfocándonos en la fase acuosa de dichos estanques de separación.

¹⁴ Fuente: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/emissions-estimation-protocol-petroleum-refineries>



Un primer punto de partida lo constituye la hoja de datos del petróleo crudo iraní que fue descargado en ENAP, la cual indica un contenido de COV aromáticos (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) del 20% en masa, que corresponde a una concentración total de aromáticos de 222 g/L, considerando una densidad específica de 0,9 para el petróleo crudo; esta concentración se repartió entre benceno, tolueno, xilenos y etilbenceno. Además, se tiene el dato de que la concentración de H₂S en el crudo iraní fue de 1900 ppm¹⁵. Usando esta información, fue posible construir la siguiente Tabla de concentraciones de COV y H₂S en la fase acuosa de los separadores API.

Tabla 4 Concentraciones de compuestos modelados en la fase acuosa (C_w) de los estanques API.

Sustancia	C _w (mg/L)	K _{ow}	C _{oil} (mg/L)
benceno	750,0	100	75.000
tolueno	250,0	300	75.000
xileno	40,0	1.000	40.000
etilbenceno	32,2	1.000	32.200
H ₂ S	951,0	1,7	1.615 ^(a)

(a) Calculado usando la densidad del crudo, que es 0,9.

En la Tabla aparecen los coeficientes de reparto (K_{ow}) entre la fase orgánica (petróleo) y la fase acuosa, tomados de la base de datos de la planilla de la EPA-EEUU o de la literatura especializada¹⁶. Hay que tener presente que las concentraciones estimadas en la Tabla 3 para los compuestos aromáticos podrían ser mayores, si suponemos que hubo tiempo suficiente en el estanque de almacenamiento de crudo para que establecieran condiciones de equilibrio entre el crudo y la fase acuosa, antes de ser trasvasijada a los estanques API. En tal caso de equilibrio, las concentraciones habrían sido las de la solubilidad máxima de cada COV aromático en agua: 1780, 590, 200 y 180 (mg/L) para benceno, tolueno, xilenos y etilbenceno, respectivamente. Por lo tanto, las concentraciones de compuestos aromáticos que aparecen en la Tabla 3 podrían haber sido incluso mayores: 2,4 veces para el benceno y tolueno, 5 veces para los xilenos y 5,6 veces para el etilbenceno. Y como las emisiones al aire son proporcionales a las concentraciones en la fase acuosa, esto significa que las estimaciones de emisiones acá hechas para los compuestos aromáticos podrían ser mayores, de acuerdo a los factores arriba señalados.

¹⁵ Fuente: Anexo A19 de la presentación ENAP que responde requerimiento de información de la SMA mediante Res Ex N°1618, de 26 de diciembre de 2018.

¹⁶ Fuente: Donald Mackay, Wan Ying Shiu, Kuo-Ching Ma y Sum Chi Lee, Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals, CRC Press, Taylor & Francis Group, EEUU, 2006.



Cabe hacer notar que las únicas mediciones de COV hechas en el estanque API se hicieron con posterioridad al trasvasije de las aguas decantadas provenientes del estanque de almacenamiento de petróleo crudo T5111. Además hubo descarga de aguas provenientes de pruebas hidrostáticas y agua con restos de crudo al API, asociada a la mantención de los estanques T5109 y T5104 a dicho separador API antes de dicha medición, por lo cual esos datos de concentración (tomados por el ISP el 24 de agosto) no representan las concentraciones de COV en los separadores API cuando ocurrió el episodio en Quintero.

En el caso del HCHO, su solubilidad es alta en agua, pudiendo alcanzar hasta el 55% en masa. En el caso del secuestrante de H₂S empleado en la descarga de crudo hacia los estanques de almacenamiento de crudo de ENAP, se trata de formol, una solución de HCHO entre 30 y 40%, estabilizada con metanol entre 10-20% de concentración. Este secuestrante se agregó al crudo antes de su descarga a los estanques de ENAP; la cantidad agregada se estimó en base a mediciones de H₂S en el crudo, las cuales ciertamente tienen error de medición, como todas las mediciones experimentales, sobre todo para caracterizar un gran volumen de crudo, el cual no tiene una composición homogénea de H₂S. Luego, se considera altamente improbable que se haya agregado la cantidad exacta de secuestrante. También se considera que el proceso de mezclado del secuestrante con el crudo está limitado por la alta viscosidad del crudo (en otras palabras, no existió mezclado perfecto del secuestrante con el crudo producto, entre otras cosas por el tiempo en que se manifiesta la reacción química), por lo que es altamente probable que haya quedado un residuo de HCHO y que éste haya quedado solubilizado en la fase acuosa de los estanques de almacenamiento de ENAP. Dada la alta solubilidad del HCHO en agua, este escenario es el más probable, pero no hay mediciones de HCHO disponibles; debido a esto, se asume que la concentración de HCHO en la fase acuosa de los estanques ENAP es de 50 g/L, muy inferior a la solubilidad máxima de este compuesto en agua (400 g/L).

La siguiente Tabla muestra las emisiones de los compuestos, calculadas usando la planilla "refinery_wastewater_emissions_tool_2011.xls"; el valor del flux de masa de cada compuesto (expresado en g/m²/s) se calculó en base al área supuesta para el separador API (200 m²) y se aplicó posteriormente a todos los estanques API presentados en la Figura 30, para fines de modelar la dispersión de esas emisiones.



Tabla 5 Estimaciones de emisiones en separador API para el escenario modelado con datos de la Tabla 4.

UNCONTROLLED AIR EMISSIONS	VALUE	UNITS	FLUX (g/m ² /s)
Benzene	63,3	g/s	0,317
Ethylbenzene	2,0	g/s	0,010
Toluene	19,4	g/s	0,097
Xylenes	2,3	g/s	0,012
Formaldehyde	4.375	g/s	21,88
Hydrogen sulfide	83,2	g/s	0,416

7.2 Resultados de las modelaciones de dispersión de emisiones de ENAP.

A continuación, se presentan gráficamente los resultados de la distribución espacial de las concentraciones modeladas de benceno, tolueno, xilenos, etilbenceno, H₂S y HCHO. Los resultados de las modelaciones se representan sobre una grilla de modelación con un espaciamiento horizontal de 250 m en el dominio de modelación (Figura 1). Además, se consideran cinco receptores discretos, los que se presentan en la siguiente Tabla.

Tabla 6 Coordenadas de los receptores discretos considerados en la modelación (UTM WGS84, Huso 19)

Receptor	UTM E, m	UTM N, m
Punto 1 (Quintero sur)	263.458	6.369.241
Punto 2 (Loncura)	264.999	6.369.705
Punto 3 (vivienda cercana a ENAP)	265.900	6.370.316
Punto 4 (Quintero norte)	263.093	6.371.030
Punto 5 (Quintero centro)	263.156	6.370.135

Se aprecia que, en todos los casos, las concentraciones abarcan desde Quintero hasta la zona de Ventanas hacia el norte de la bahía de Quintero, con lo cual el área de influencia de las emisiones de ENAP se extiende principalmente a lo largo del borde costero. Cabe hacer notar que no hubo monitoreo de BTEX ni de HCHO ni de H₂S en la zona industrial de Ventanas, por lo que no hay información adicional que pueda complementar las modelaciones que se presentan en este Informe. La estación de monitoreo de COV de propiedad de GNL Quintero S.A. no registró datos de COV entre los días 17 a 22 de agosto de 2018.

Servicio de modelación de calidad del aire para la zona de Quintero-Puchuncaví

Informe Final

Página 38 de 61

Código V01: FI-A.03-DSA

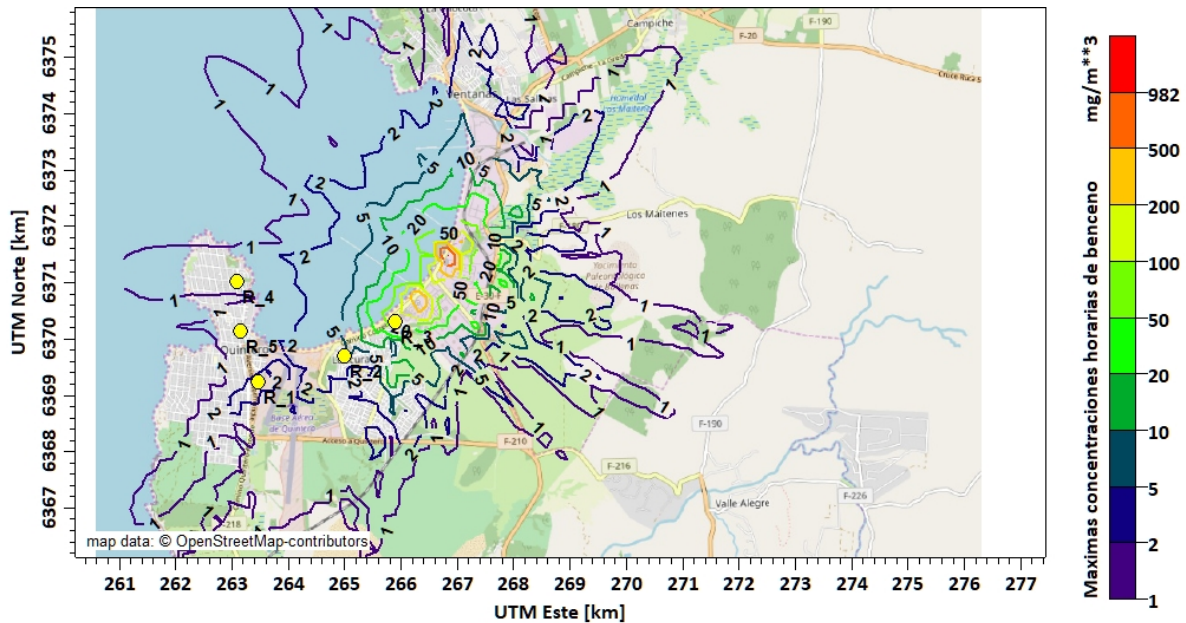


Figura 17 Distribución espacial de las concentraciones horarias máximas de benceno (mg/m^3) en la zona modelada, 17 al 26 de agosto 2018.

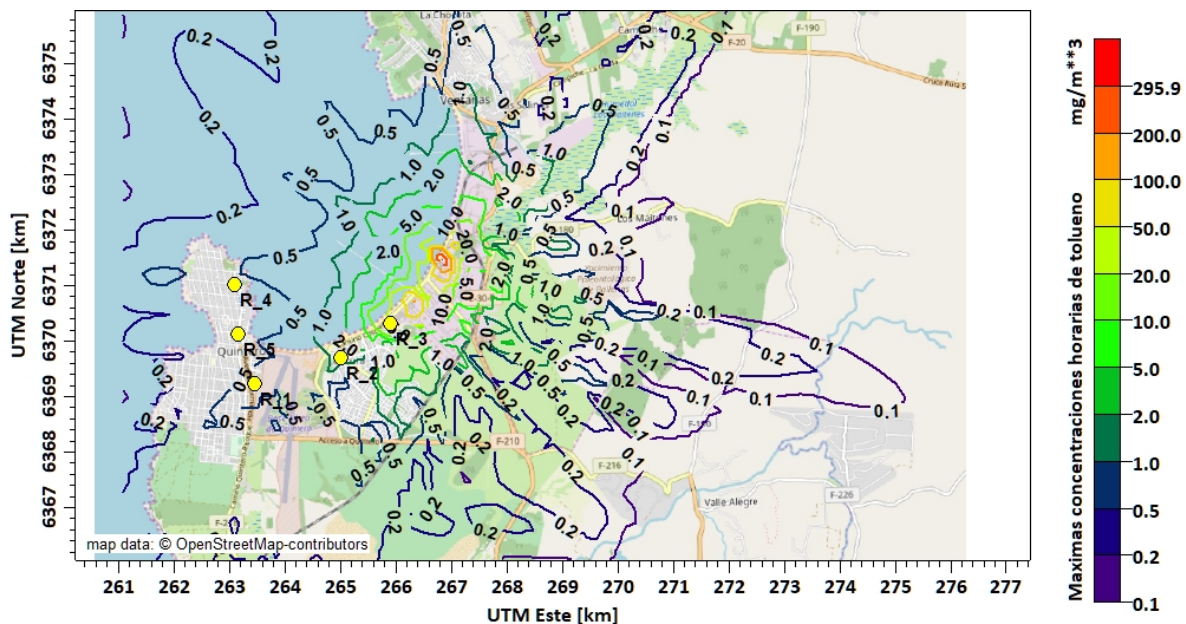


Figura 18 Distribución espacial de las concentraciones horarias máximas de tolueno (mg/m^3) en la zona modelada, 17 al 26 de agosto 2018.

Servicio de modelación de calidad del aire para la zona de Quintero-Puchuncaví

Informe Final

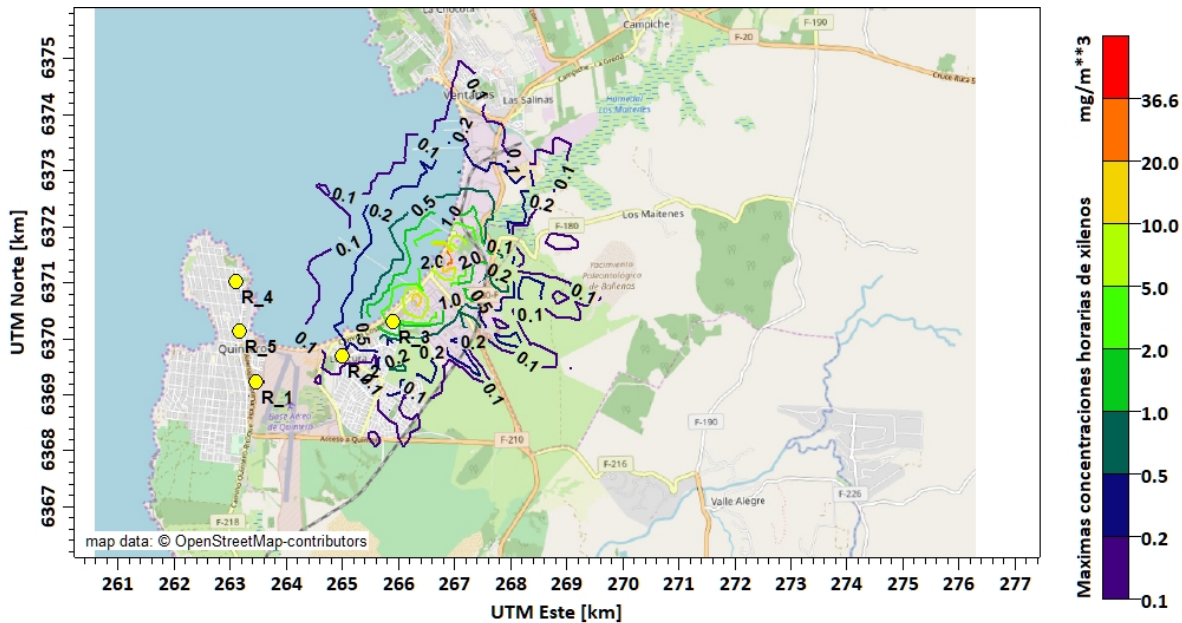


Figura 19 Distribución espacial de las concentraciones horarias máximas de xilenos (mg/m^3) en la zona modelada, 17 al 26 de agosto 2018.

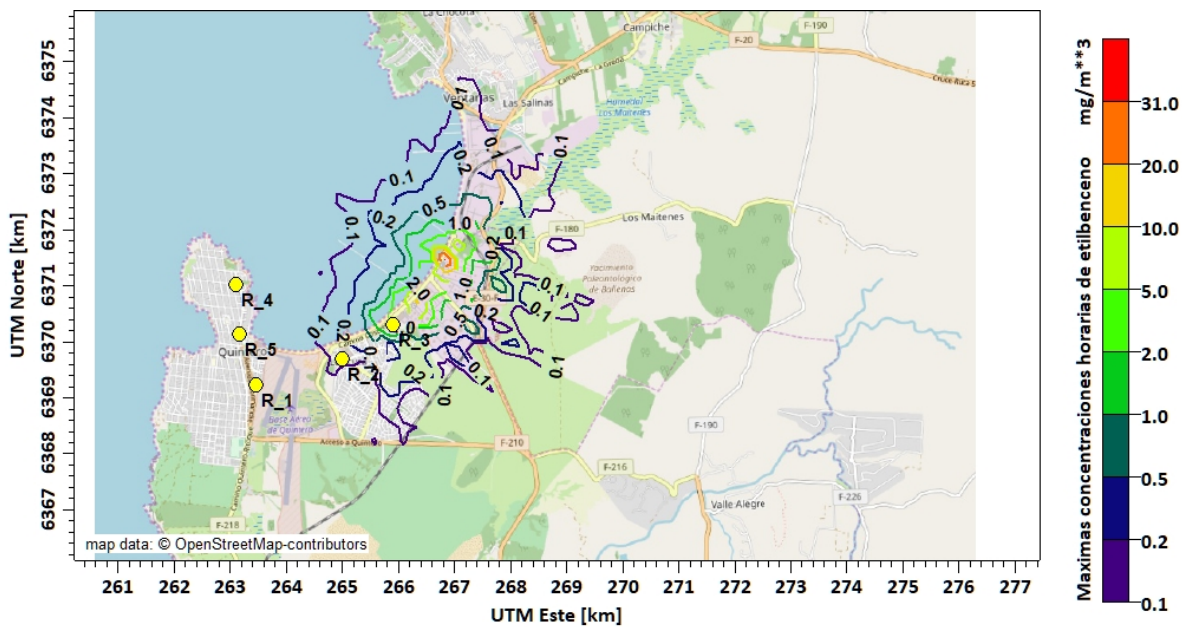


Figura 20 Distribución espacial de las concentraciones horarias máximas de etilbenceno (mg/m^3) en la zona modelada, 17 al 26 de agosto 2018.

Servicio de modelación de calidad del aire para la zona de Quintero-Puchuncaví

Informe Final

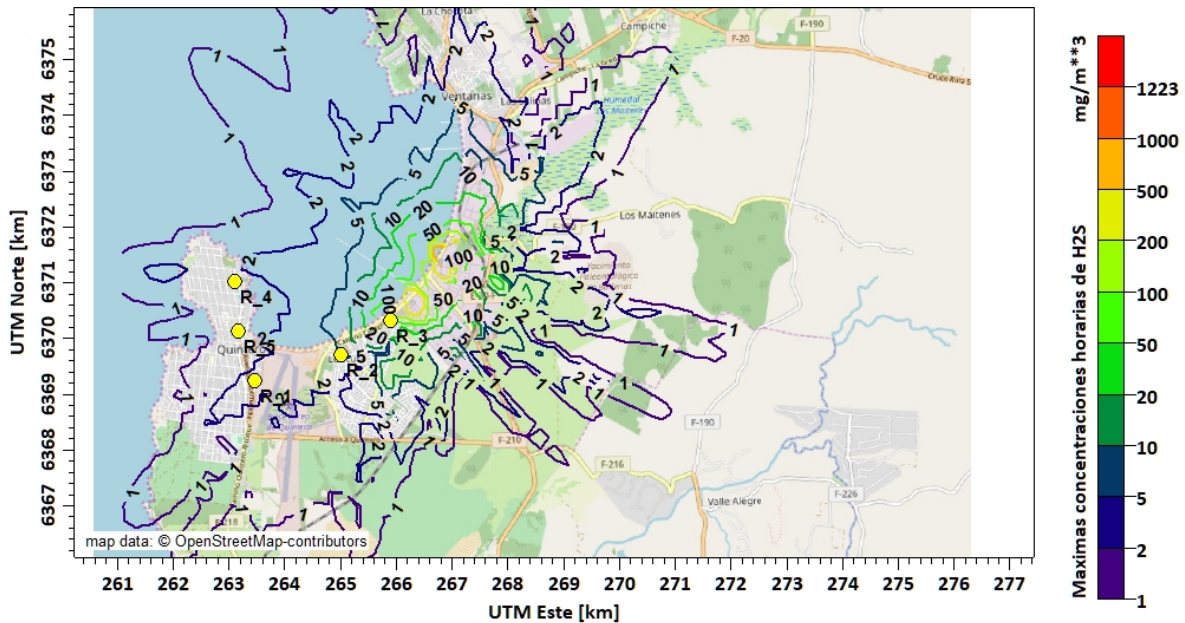


Figura 21 Distribución espacial de las concentraciones horarias máximas de H₂S (mg/m³) en la zona modelada, 17 al 26 de agosto 2018.

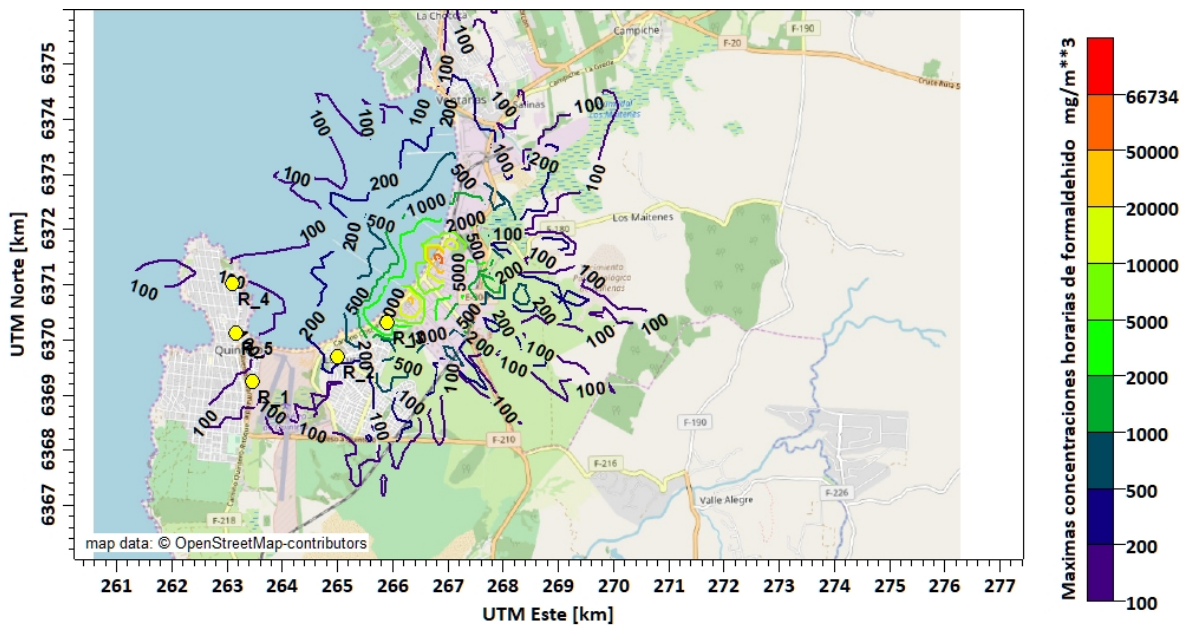


Figura 22 Distribución espacial de las concentraciones horarias máximas de HCHO (mg/m³) en la zona modelada, 17 al 26 de agosto 2018.

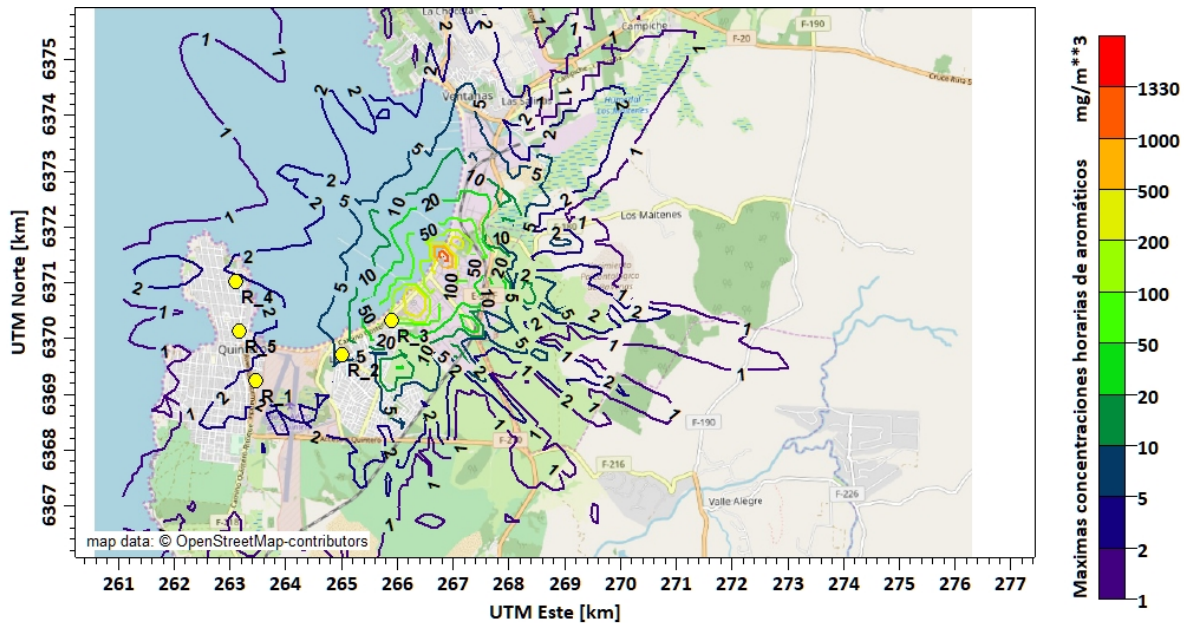


Figura 23 Distribución espacial de las concentraciones horarias máximas de la suma de los COV aromáticos (mg/m^3) en la zona modelada, 17 al 26 de agosto 2018.

7.2.1 Modelación de dispersión de HCHO de ENAP: trayectorias de plumas, 21 de Agosto

En esta sección se analiza la dispersión de HCHO de las emisiones de los separadores API, con énfasis en las trayectorias de plumas de emisiones dispersadas, para poder visualizar los aportes de COV, HCHO y H_2S en la zona de Quintero el día 21 de agosto.

Las siguientes figuras muestran la dispersión de las emisiones de HCHO de ENAP en forma horaria, para el día 21 de agosto, entre las 6 am y 13 pm. Se aprecia que efectivamente, a partir de las 6 am, la pluma de las emisiones de ENAP pasa por Quintero, rotando contra el sentido del reloj (al igual que el viento medido en la zona, Figura 5), lo cual se mantiene hasta la 1 pm, donde la pluma se empieza a alejar de Quintero, y empieza a cambiar su dirección de acuerdo al viento predominante a esa hora.

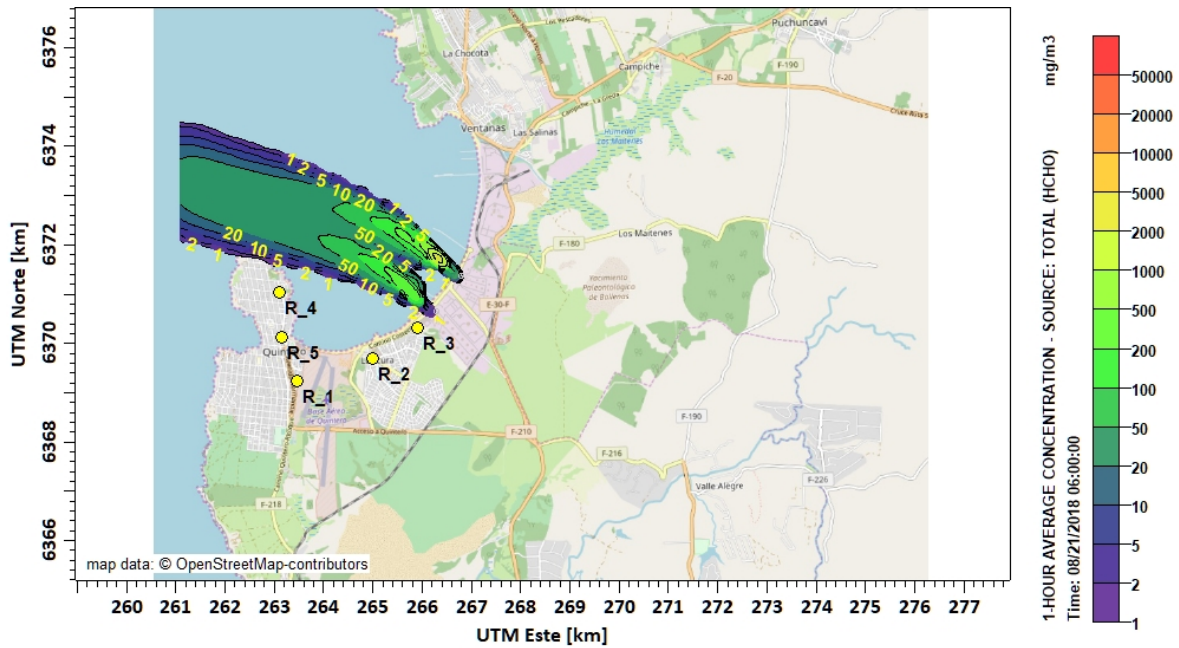


Figura 24 Concentración de HCHO en la zona de Quintero (mg/m³), 21 de agosto de 2018, 06 hora local. Fuente emisora: estanques API de ENAP.

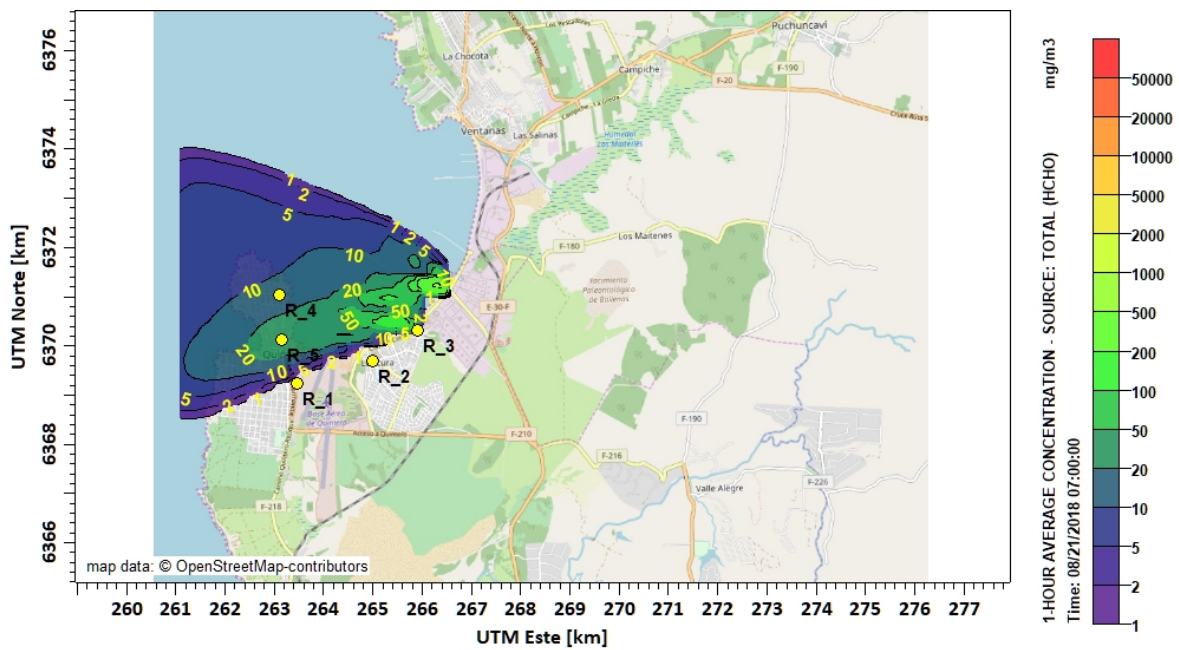


Figura 25 Concentración de HCHO en la zona de Quintero (mg/m³), 21 de agosto de 2018, 07 hora local. Fuente emisora: estanques API de ENAP.

Servicio de modelación de calidad del aire para la zona de Quintero-Puchuncaví

Informe Final

Página 43 de 61

Código V01: FI-A.03-DSA

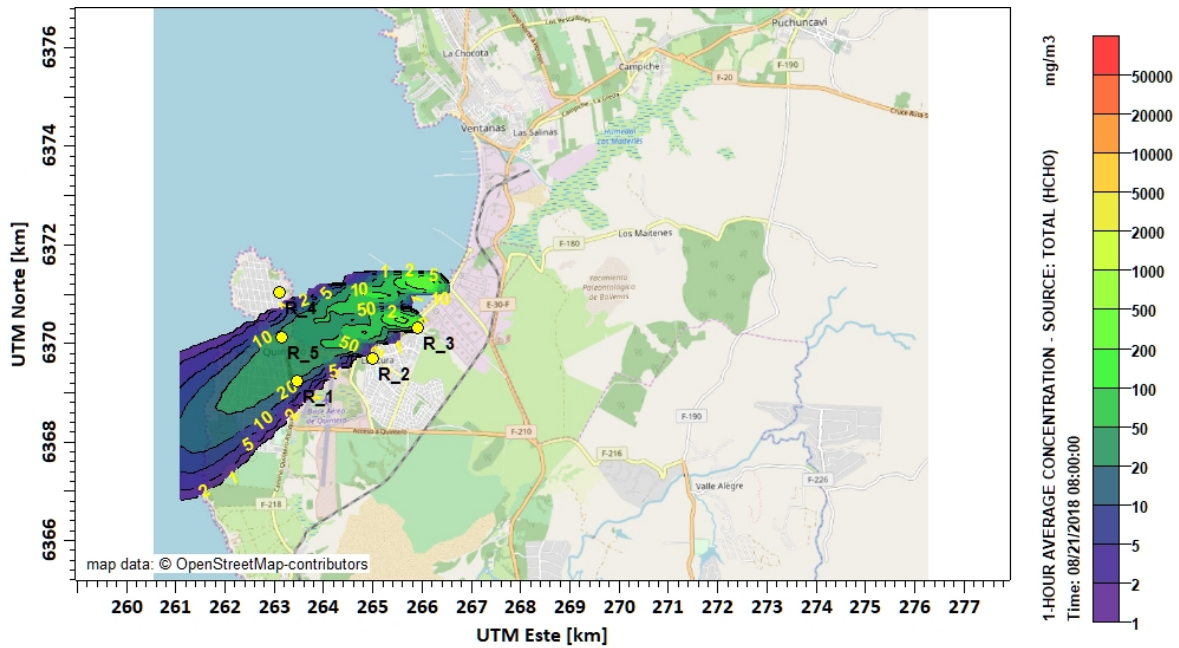


Figura 26 Concentración de HCHO en la zona de Quintero (mg/m^3), 21 de agosto de 2018, 08 hora local. Fuente emisora: estanques API de ENAP.

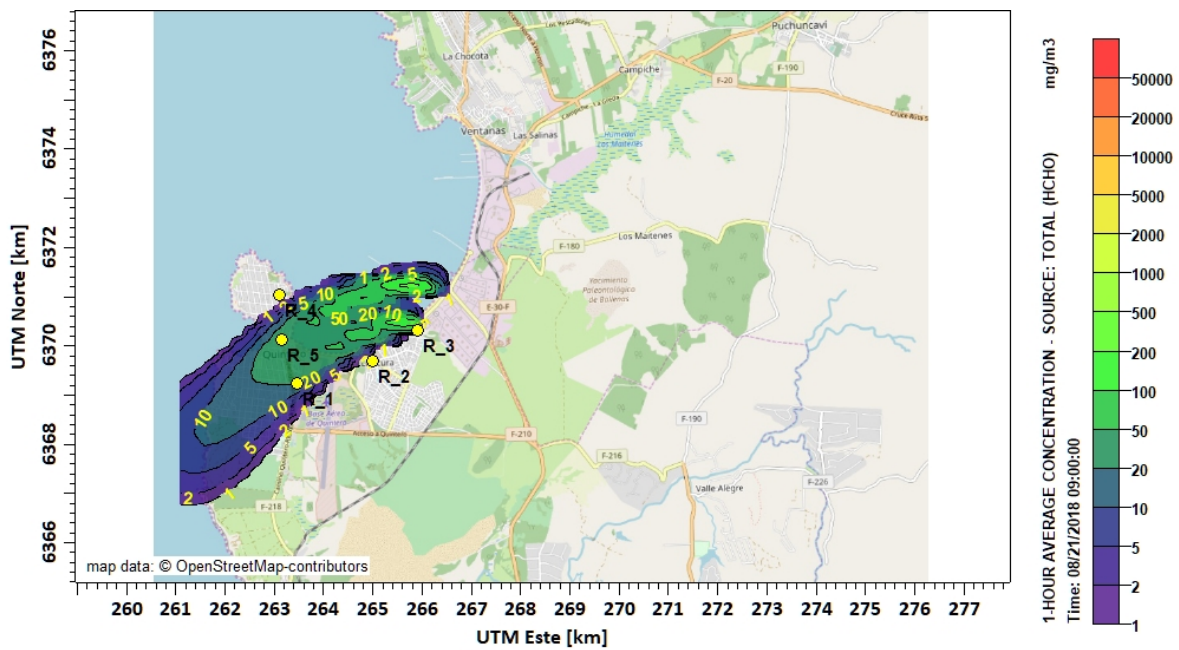


Figura 27 Concentración de HCHO en la zona de Quintero (mg/m^3), 21 de agosto de 2018, 09 hora local. Fuente emisora: estanques API de ENAP.

Servicio de modelación de calidad del aire para la zona de Quintero-Puchuncaví

Informe Final

Página 44 de 61

Código V01: FI-A.03-DSA

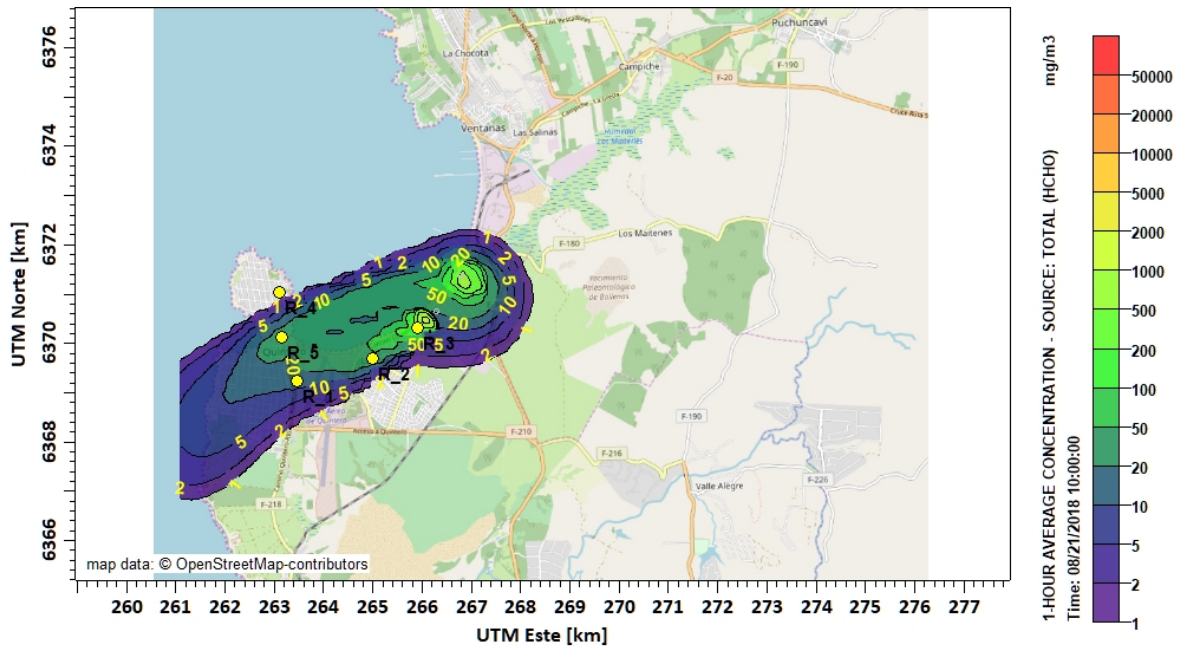


Figura 28 Concentración de HCHO en la zona de Quintero (mg/m^3), 21 de agosto de 2018, 10 hora local. Fuente emisora: estanques API de ENAP.

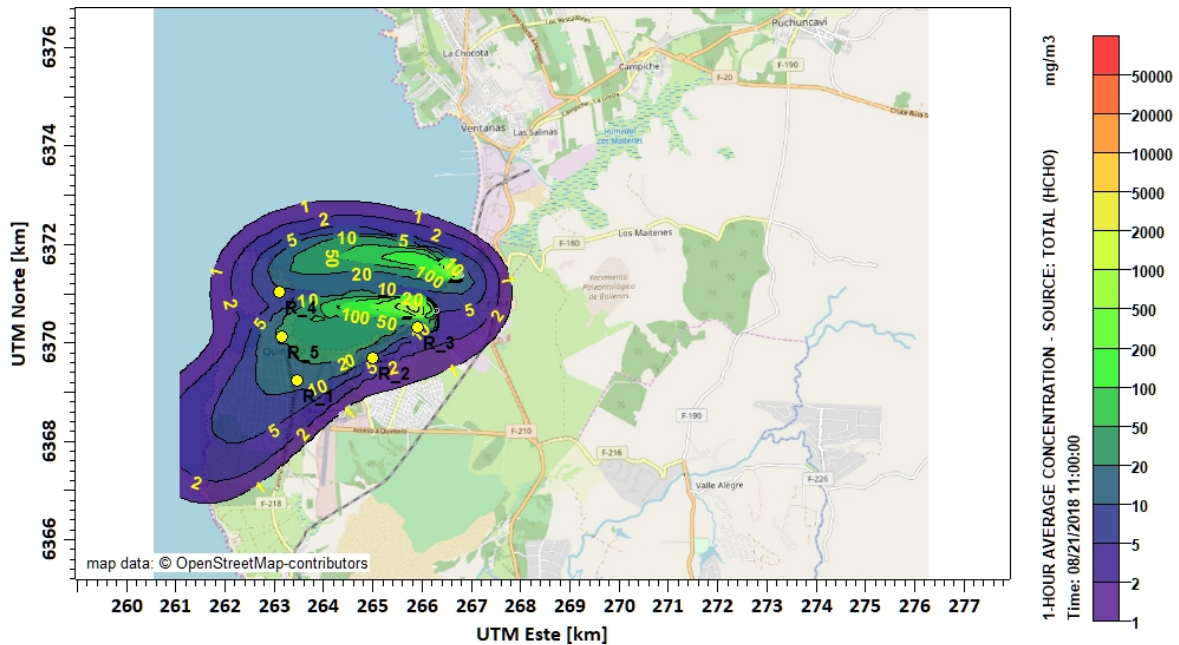


Figura 29 Concentración de HCHO en la zona de Quintero (mg/m^3), 21 de agosto de 2018, 11 hora local. Fuente emisora: estanques API de ENAP.

Servicio de modelación de calidad del aire para la zona de Quintero-Puchuncaví

Informe Final

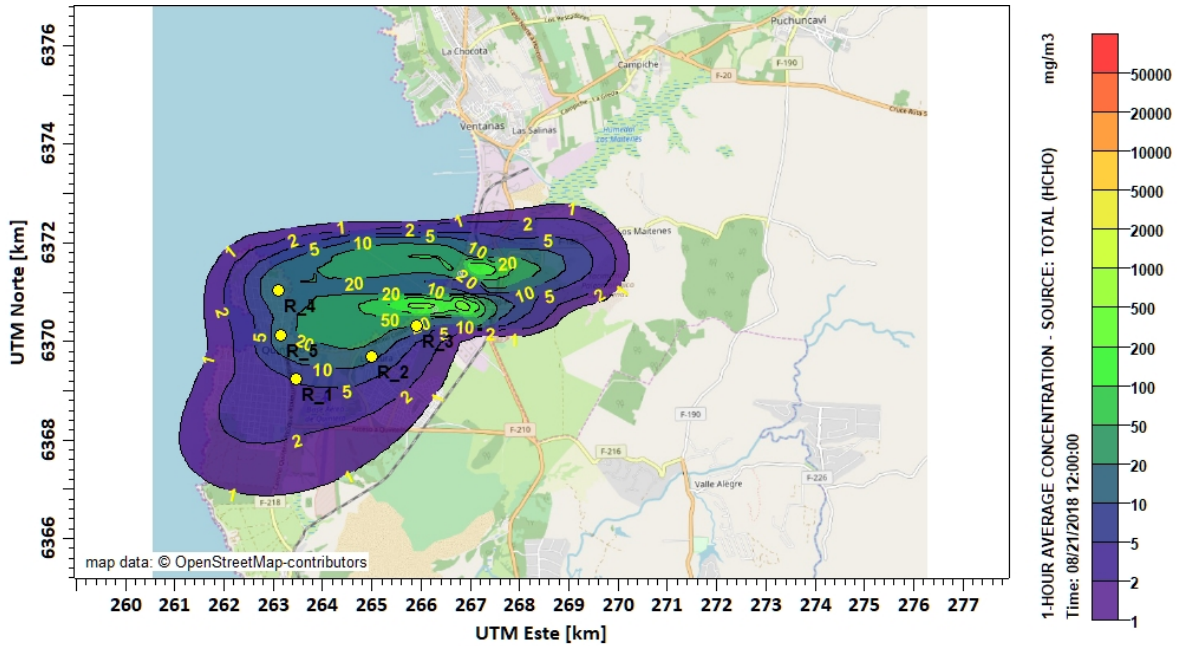


Figura 30 Concentración de HCHO en la zona de Quintero (mg/m^3), 21 de agosto de 2018, 12 hora local. Fuente emisora: estanques API de ENAP.

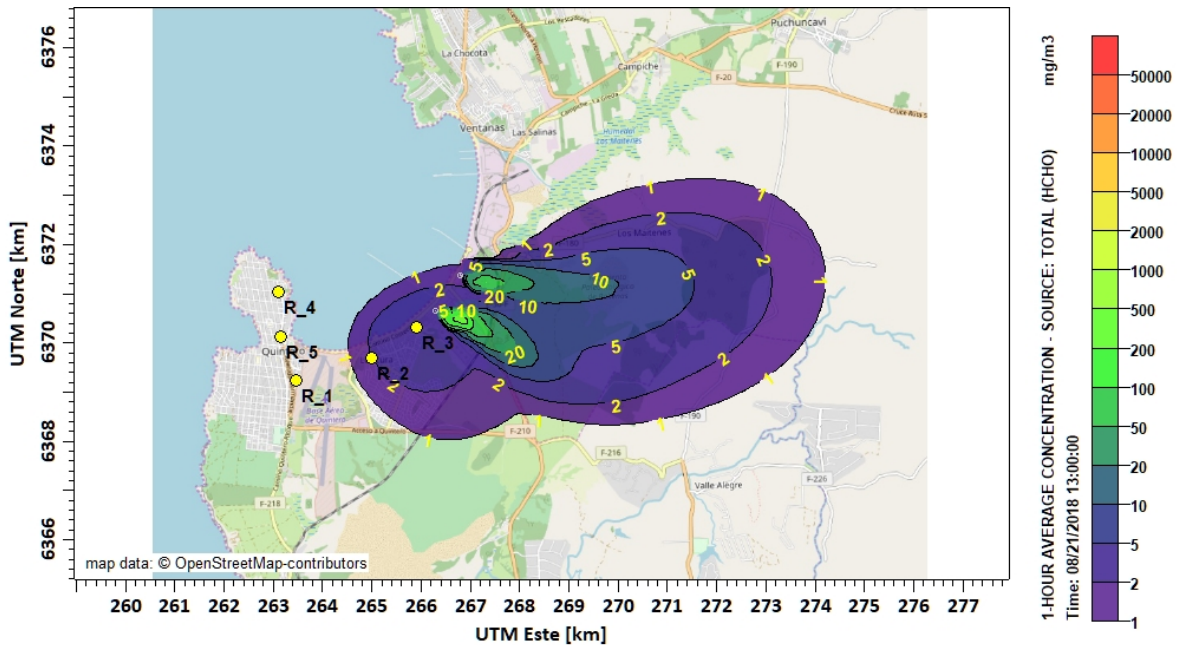


Figura 31 Concentración de HCHO en la zona de Quintero (mg/m^3), 21 de agosto de 2018, 13 hora local. Fuente emisora: estanques API de ENAP.

Servicio de modelación de calidad del aire para la zona de Quintero-Puchuncaví

Informe Final



7.2.2 Modelación de dispersión de HCHO y H₂S de ENAP: concentraciones en Quintero, 21 al 23 de agosto.

En esta sección se presentan los resultados de las modelaciones de HCHO y H₂S, sustancias que solo han sido emitidas por ENAP, considerando los tres receptores ubicados en Quintero (puntos 1, 4 y 5 en Tabla 5). La siguiente figura muestra las máximas concentraciones horarias (en los tres receptores) modeladas para HCHO en Quintero. Se aprecia que las magnitudes de las concentraciones modeladas son consistentes con la presencia de síntomas tales como irritación, lagrimeo, tos y sensación de quemazón en la garganta¹⁷.

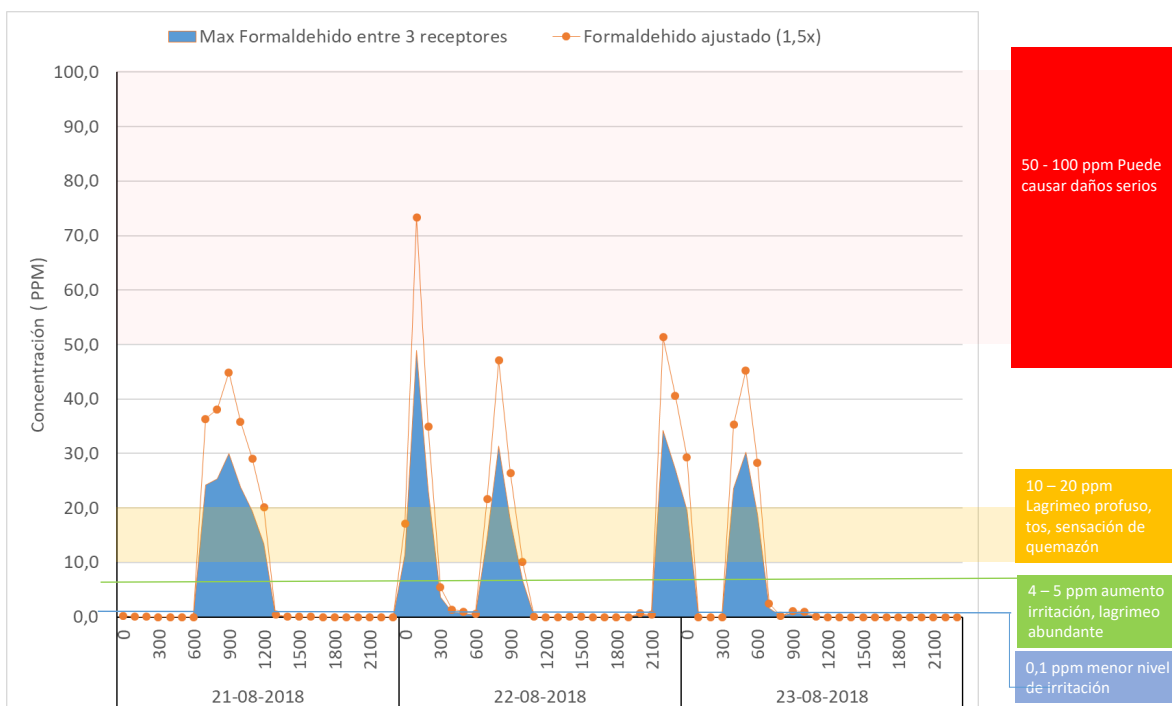


Figura 32 Máximas concentraciones horarias modeladas en Quintero (ppm), 21 al 23 de agosto 2018.

¹⁷ Fuente: Informe Final: "ANÁLISIS DE CONCORDANCIA ENTRE SINTOMATOLOGÍA REPORTADA POR LA POBLACIÓN DE QUINTERO Y LOS EFECTOS A LA SALUD SECUNDARIOS POR LA EXPOSICIÓN A COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES BTEX, FORMALDEHÍDO Y/O ÁCIDO SULFÚDRICO DESCRITOS EN LITERATURA CIENTÍFICA", CITUC, diciembre 2019.



En el gráfico de la figura anterior se incluye además una cota superior a las modelaciones, asociada a la incertidumbre que poseen los modelos de dispersión en representar los procesos de transporte y depositación de los contaminantes, sobre todo considerando la complejidad del uso de suelo en la zona modelada, que es básicamente el borde costero entre la zona industrial y la ciudad de Quintero. Esta cota superior es un 50% por sobre el valor modelado, como ya se ha explicado en detalle en la sección 6.3.3 del presente Informe¹⁸. Y se debe interpretar de manera probabilística, ya que hay incertidumbres involucradas en el modelo de dispersión.

Cabe hacer notar que las situaciones de altas concentraciones modeladas ocurren principalmente en la noche y madrugada, por lo que no es necesario corregir las concentraciones modeladas por efectos de reacciones de fotólisis (caso del HCHO), las que se presentan con mayor intensidad al mediodía, ya que dependen de la radiación solar en la zona. En todo caso, los días 21 y 22 de agosto hubo nubosidad en la zona, lo que hizo disminuir bastante la radiación solar medida en la estación meteorológica Principal de Codelco División Ventanas (Figura 7). Por lo tanto, el tema de la reactividad química diurna de los compuestos modelados es poco relevante en el presente análisis, que se enfoca a situaciones que ocurrieron de noche o de madrugada en la zona de Quintero.

La siguiente figura muestra el caso de las concentraciones de H₂S modeladas para Quintero. En este caso, se superó el umbral odorífero, en cada uno de los días modelados, en la mayoría de las horas en las cuales la pluma pasó sobre Quintero. En todo caso, este umbral se ha determinado a partir de análisis de situaciones de exposición ocupacional, donde los participantes son adultos. Es decir, el umbral podría ser menor para niños o adultos mayores (población más sensible), lo que quiere decir que la mayoría de la población de Quintero fue capaz de detectar el olor.

¹⁸ Fuente: 40 CFR Part 51 Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and Other Revisions; Final Rule. Federal Register / Vol. 70, No. 216 / Wednesday, November 9, 2005 / Rules and Regulations

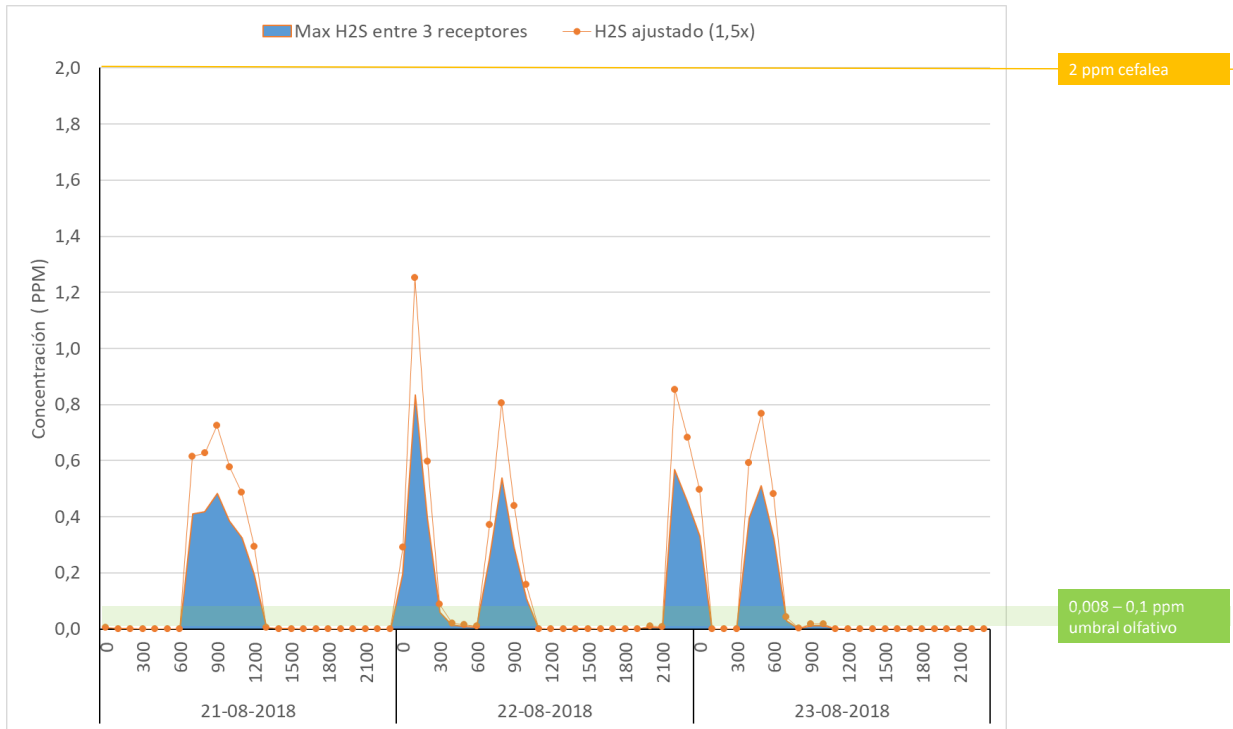


Figura 33 Ídem a Figura anterior, pero para el caso del sulfuro de hidrógeno (H₂S).



8 Caso de otras emisiones de COV en la zona

En esta Sección se presentan las emisiones de COV que se han recopilado para otras fuentes industriales en la zona. El objetivo es modelar el conjunto de todas las fuentes de COV en la zona, a fin de estimar la participación de ellas en el total de las concentraciones modeladas para el periodo del 17 al 26 de agosto. Cabe hacer notar que, a excepción de ENAP, no existen fuentes emisoras ni de HCHO ni de H₂S en la zona industrial de las comunas de Puchuncavi y Quintero.

8.1 Caso de estanques de almacenamiento de OXIQUM

Las emisiones fugitivas de COV de los estanques de OXIQUM se han estimado previamente, por lo que solamente vamos a tomar esos resultados¹⁹ (anuales) para fines de modelar el periodo arriba citado. Se va a suponer que la emisión es constante en todo el año, ya que la metodología de cálculo no permite estimar emisiones con resolución temporal de 1 hora.

La siguiente Tabla muestra las emisiones de los seis estanques con mayores emisiones fugitivas, junto con sus parámetros de altura, diámetro del estanque y ubicación geográfica. Para simplificar los resultados, se agruparon las emisiones de esos seis estanques en dos grupos: las emisiones de los estanques de gasolina se asimilaron a emisiones de xileno y las restantes emisiones fugitivas se asimilaron a emisiones de tolueno. Esta es una simplificación, porque las emisiones corresponden a una mezcla de numerosos COV, donde los aromáticos son una fracción del total emitido. Sin embargo, al asumir que el total de emisiones corresponde a compuestos aromáticos (BTEX), esto permite hacer una estimación conservadora (cota superior) de las emisiones de BTEX asociadas a esta industria.

La siguiente Figura muestra la ubicación de las seis fuentes modeladas. Cabe hacer notar que hay más estanques de almacenamiento de COV en Oxiquim, pero solamente se han escogido los que tienen las seis mayores emisiones de COV, de manera que sean representativos de la situación actual de la empresa. Cabe hacer notar que las estimaciones fueron hechas para el periodo 2014-2015, pero ellas dependen solamente de las dimensiones y geometrías de los estanques y de las temperaturas ambientales, así que se asume que las emisiones se mantienen en magnitud.

¹⁹ Fuente: Anexo 5-1 Estimación emisiones COV s Adenda 2, EIA Proyecto "Terminal Multipropósito Oxiquim, Bahía de Quintero", Región de Valparaíso, Chile. Preparado por: Gestión Ambiental Consultores S.A, Enero 2016.

Tabla 7 Características de las fuentes de emisión fugitiva de COV en Oxiquim.

Fuente	Altura (m)	Diámetro(m)	Emisión (g/s/m ²)	UTM E (m)	UTM N (m)
Estanque 107B	17	9,35	0,00049	266.872	6.371.516
Estanque 108	12	12,3	0,00018	266.850	6.371.476
Estanque 110	12	7,5	0,00052	266.883	6.371.553
Estanque 201	12	4,3	0,00067	266.830	6.371.442
Estanque 307	9	4,75	0,00060	266.824	6.371.440
Estanque 502B	14	16	0,00052	267.060	6.371.464

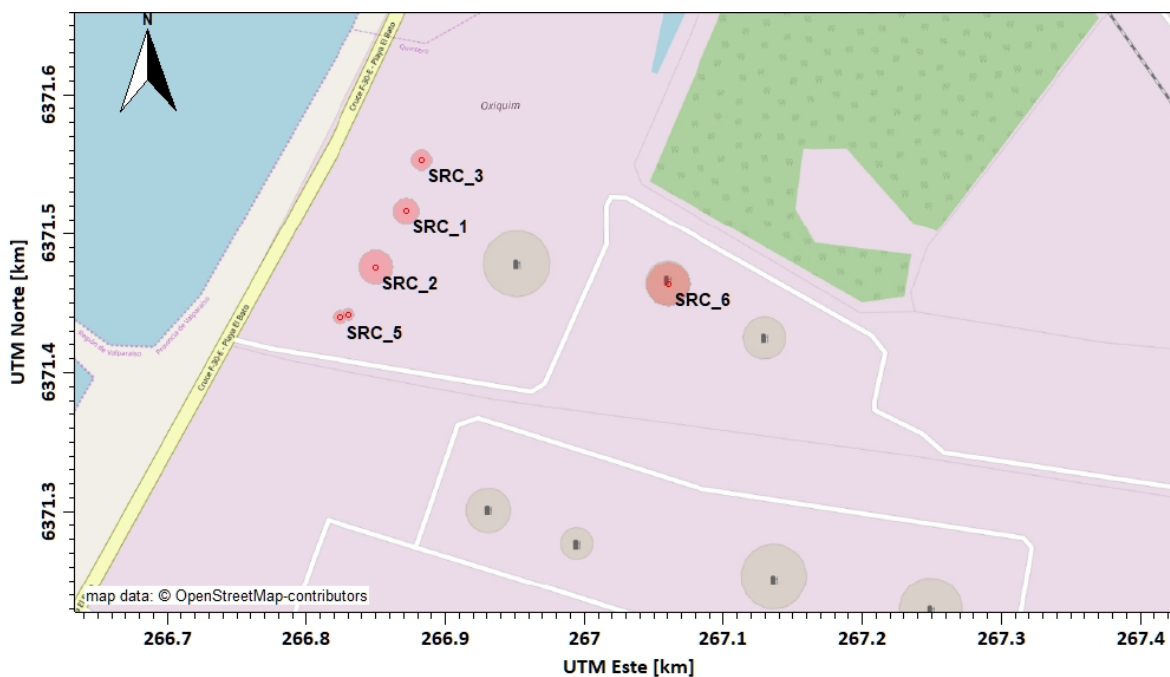


Figura 34 Ubicación de las seis mayores emisiones fugitivas de COV de Oxiquim. Las fuentes 4 y 5 están cercanas entre sí.



8.2 Caso de estanques de almacenamiento de COPEC

En esta sección se muestra los resultados de estimar las emisiones evaporativas de los estanques de almacenamiento de combustibles de COPEC. El periodo modelado nuevamente es del 17 al 26 de agosto de 2018. Las emisiones fugitivas de COV de los estanques de COPEC se estiman empleando la metodología propuesta por la US-EPA (AP 42, Sección 7.1, *Organic Liquid Storage Tanks*) para fines de modelar el periodo arriba citado. Se va a suponer que la emisión es constante en todo el año, ya que la metodología de cálculo no permite estimar emisiones con resolución temporal de 1 hora.

La siguiente Tabla muestra las emisiones de los nueve estanques de almacenamiento de combustibles, junto con sus parámetros de altura, diámetro del estanque y ubicación geográfica. Para simplificar los resultados, se agruparon las emisiones de esos seis estanques en tres grupos: las emisiones de los estanques de gasolina se asimilaron a emisiones de xileno, aquellas de los estanques de diésel a emisiones de tolueno y las restantes emisiones fugitivas (estanques de kerosene de aviación), se asimilaron a emisiones de benceno. Las ubicaciones y características de cada estanque se obtuvieron de la información ingresada al SEIA²⁰. Nuevamente, el total de emisiones de COV se asimila a compuestos aromáticos solamente (BTEX), de manera de usar una estimación conservadora, para fines de comparación con los aportes de los estanques API de ENAP.

Tabla 8 Características de las fuentes de emisión fugitiva de COV en COPEC.

Fuente	Altura (m)	Diámetro(m)	Emisión (g/s/m ²)	UTM E (m)	UTM N (m)
T-201	12	42,6	9,70E-06	266.199	6.370.498
T-202	13,2	48,8	1,56E-04	266.248	6.370.448
T-203	13,2	48,8	1,56E-04	266.291	6.370.498
T-204	13,2	48,8	1,56E-04	266.245	6.370.545
T-212	14,6	45,6	1,58E-05	266.309	6.370.393
T-213	14,6	45,6	1,58E-05	266.270	6.370.342
T-601	12,6	14	5,00E-06	266.375	6.370.442
T-602	13	26	6,30E-06	266.348	6.370.464
T-603	13	26	6,30E-06	266.361	6.370.422

²⁰ Fuentes: DIA Proyecto "AMPLIACIÓN TERMINAL DE PRODUCTOS IMPORTADOS QUINTERO" (RCA 250/2014), DIA Proyecto "Planta de Conversión de Aceites Residuales a Aditivo para Combustible Oleoso", ambos de COPEC S.A.

Las siguientes Figuras muestran la ubicación de las nueve fuentes modeladas.

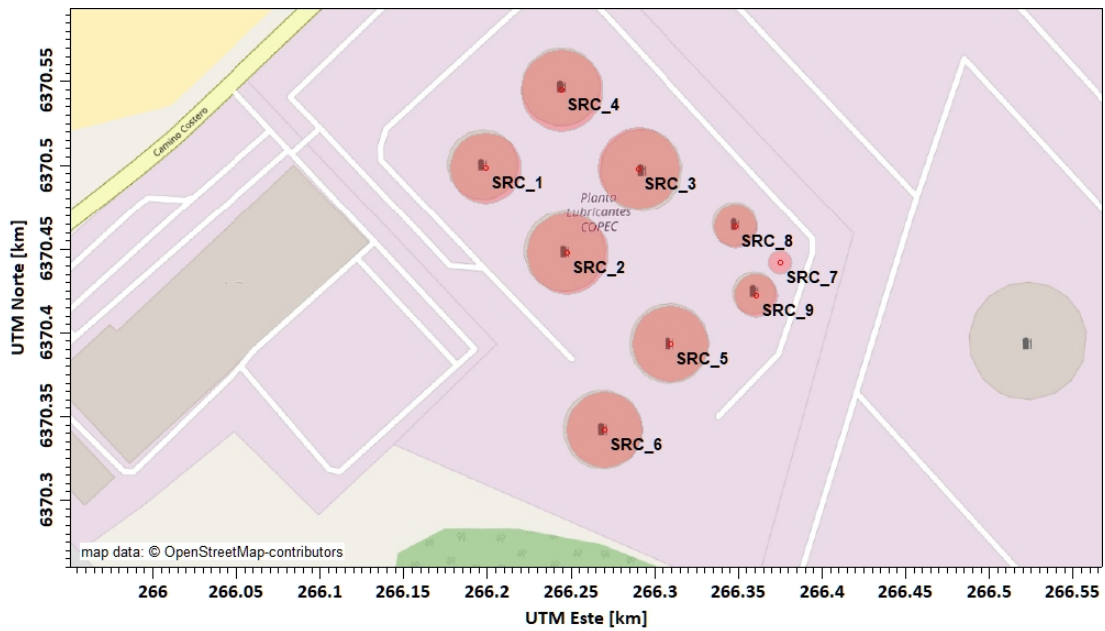


Figura 35 Ubicación de los nueve estanques de combustible de COPEC S.A. modelados. Imagen de Open Street Map.



Figura 36 Ubicación de los nueve estanques de combustible de COPEC S.A. modelados. Imagen de Google Earth.



8.3 Caso de las emisiones del complejo termoeléctrico de Ventanas de AES Gener

Estas emisiones fueron proporcionadas por el mandante y consisten en emisiones horarias de benceno y tolueno principalmente, para el periodo modelado.

8.4 Resultados de la modelación de todas las fuentes de emisión de COV

Los resultados de la modelación conjunta de todas las fuentes de emisión (incluyendo las emisiones de los estanques API de ENAP) entrega resultados muy similares a los ya presentados para la zona de Quintero para los COV aromáticos, por esto no se presentan en esta Sección. La siguiente figura, a modo de ejemplo, muestra los aportes de las fuentes de COV de ENAP y de las demás fuentes modeladas de COV, para el caso de la zona de Quintero en los días 21 a 23 de agosto (receptores 1, 4 y 5). Se aprecia que en los tres sitios en Quintero, el aporte de las emisiones de ENAP es ampliamente mayoritario, superior al 95% de las concentraciones allí modeladas en esos tres días.

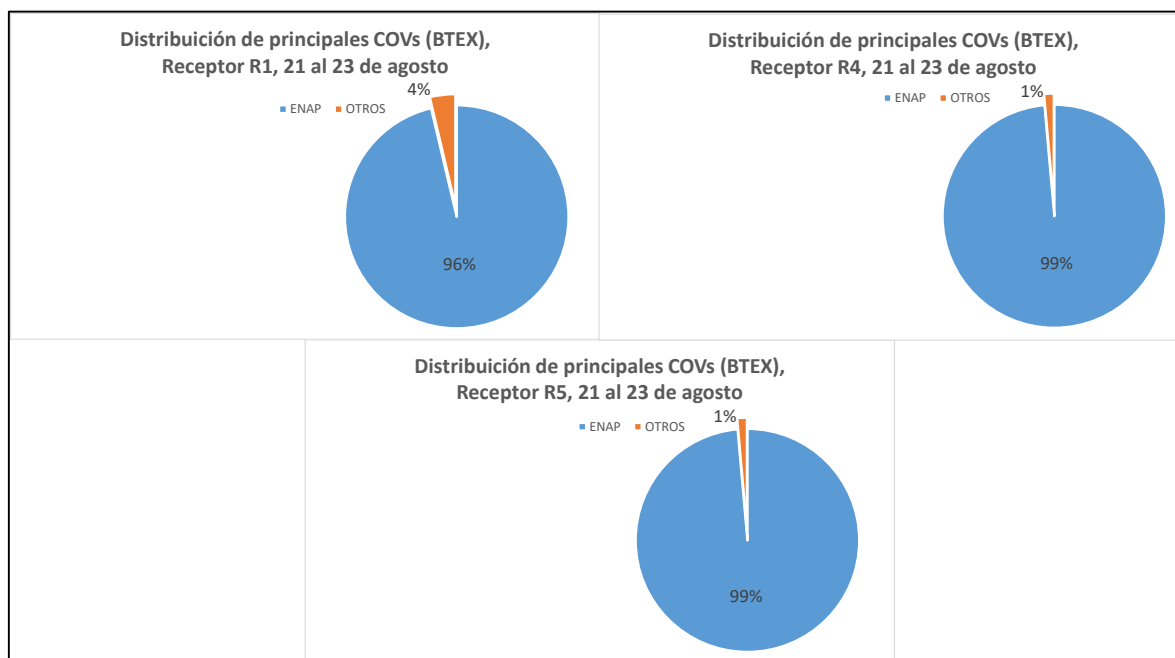


Figura 37 Comparación de aportes de fuentes a las concentraciones de COV medidas en Quintero, 21 al 23 de agosto.

La siguiente figura muestra las máximas concentraciones simuladas en los días 21 a 23 de agosto en la zona de Quintero, para el caso del benceno (máximo valor entre los receptores 1, 4 y 5). Además de los aportes modelados (incluyendo todas las fuentes en la zona) que se grafican con área sólida, también se agrega un factor de incertidumbre de la modelación de 1,5. Es decir, podría haber un 50% más de concentración modelada, cuando se considera que los modelos de dispersión tienen incertidumbre en sus supuestos (ver sección 6.3.3). La cantidad de horas que hubo exposición fue de 6 h el 21 de agosto, 11 h el 22 de agosto y 7 h el 22-23 de agosto.

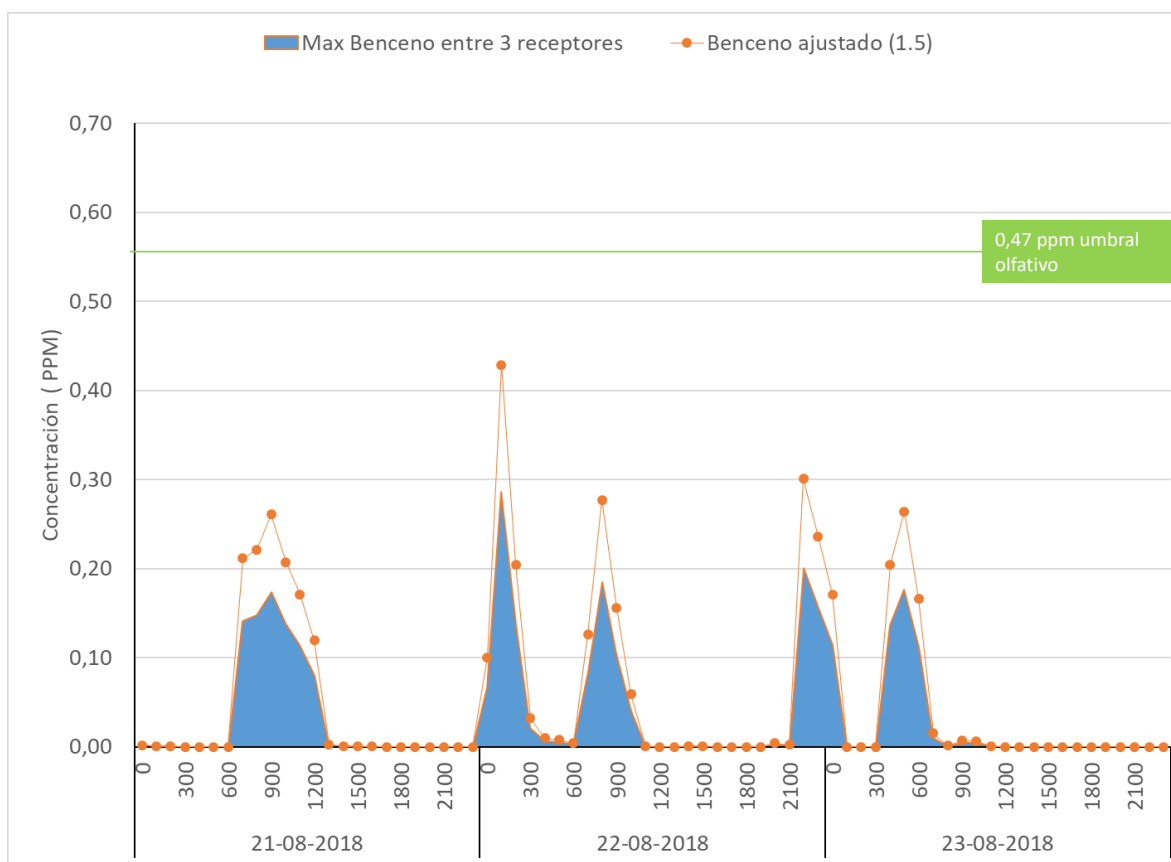


Figura 38 Máximas concentraciones horarias de benceno modeladas en Quintero.

Se aprecia que, al considerarse el benceno máximo modelado en Quintero, las concentraciones no llegan a exceder el umbral olfativo para este COV aromático. Dado que ese valor umbral es un valor para un adulto promedio (en sensibilidad), es posible que los olores hayan sido detectados por parte de la población más sensible a ellos (niños, adultos mayores).

Servicio de modelación de calidad del aire para la zona de Quintero-Puchuncaví

Informe Final

Página 55 de 61

Código V01: FI-A.03-DSA



La siguiente Figura muestra el caso del total de compuestos aromáticos (BTEX) modelados en la zona de Quintero, usando el mismo formato de gráfico. La cantidad de horas que hubo exposición fue de 6 h el 21 de agosto, 11 h el 22 de agosto y 7 h el 22-23 de agosto.

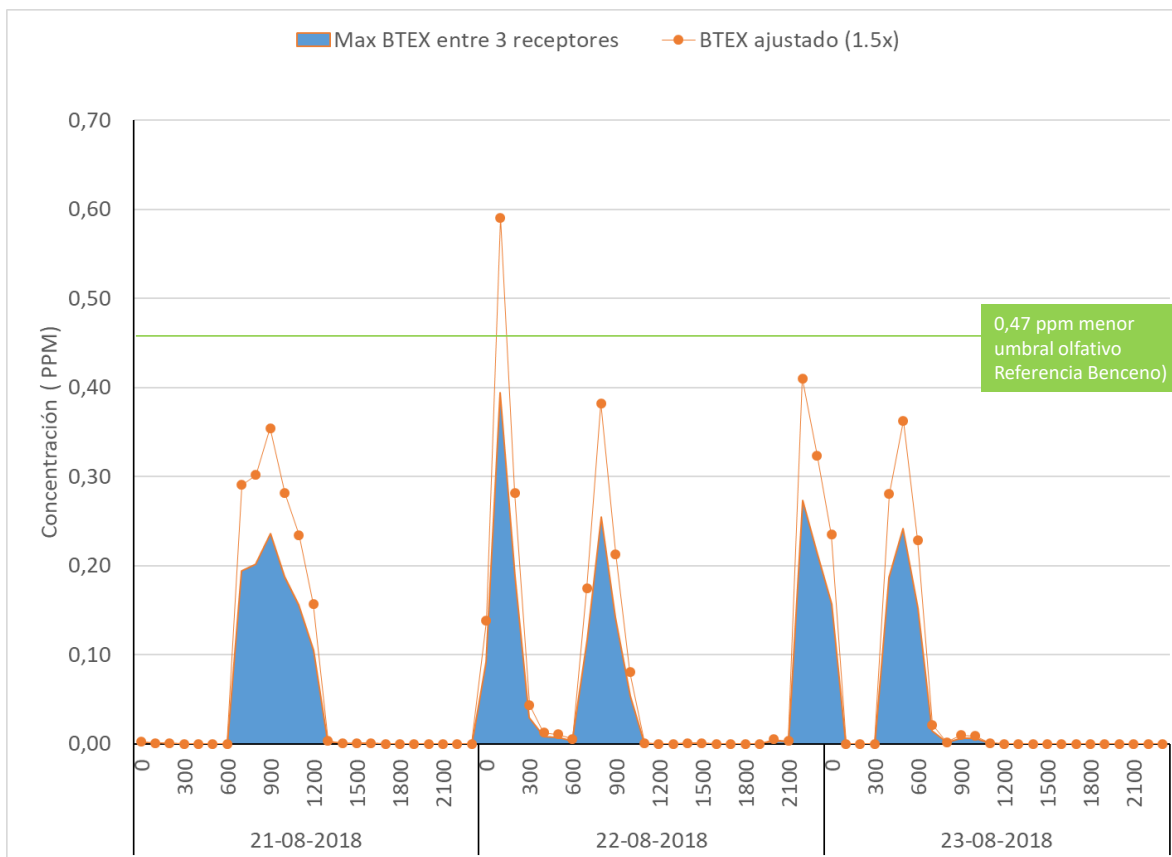


Figura 39 Máximas concentraciones horarias de BTEX modeladas en Quintero.

Luego, en este caso de los BTEX tampoco se puede establecer que se hay superado el umbral olfativo para estos compuestos. Estos dos resultados dependen de los supuestos hechos en la estimación de emisiones de los separadores API de ENAP. Como ya se ha mencionado en la sección 7.1.2, las concentraciones asumidas para BTEX podrían haber sido mayores cuando comenzó el trasvase de los estanques de crudo hacia los separadores API de ENAP. Por ejemplo, en el caso del benceno y tolueno, las concentraciones (y emisiones) podrían haber sido hasta 2,5 veces mayores, en el caso que en la Tabla 3 se hubiese puesto el valor de la máxima solubilidad de esos dos compuestos en agua.

Servicio de modelación de calidad del aire para la zona de Quintero-Puchuncaví

Informe Final

Página 56 de 61

Código V01: FI-A.03-DSA



En resumen, los resultados de las modelaciones indican que los aportes de ENAP a las concentraciones modeladas de BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) en la zona de Quintero los días 21 a 23 de agosto explican más del 95% de las concentraciones allí modeladas. Por supuesto, las concentraciones de H₂S y de HCHO solo provienen de los estanques API de ENAP, como ya se ha explicado.



9 Conclusiones

En este estudio se analizó la situación de la zona de Quintero-Puchuncaví para el periodo del 17 al 26 de agosto de 2018, el cual incluye un episodio de aumento de las consultas médicas en Quintero, el que comenzó el 21 de agosto, extendiéndose toda esa semana, y que alcanzó un máximo semanal el día 23 de agosto. Este estudio difiere del anterior estudio de DICTUC de julio de 2019 (Informe N°1525926), principalmente porque ahora se incluye más antecedentes técnicos, mejor información meteorológica para el modelo de dispersión, evaluación del modelo de dispersión durante el episodio, estimaciones de emisiones en base a metodología oficial de la EPA de EEUU, y se consideran todas las fuentes emisoras de COV en la zona (ver Sección 1 para más detalles).

Con respecto a la meteorología, se constató que entre los días 20 y 23 de agosto la velocidad del viento fue baja en todas las estaciones de la red de monitoreo, y que las alturas de mezclado también fueron bajas en esos días, lo que indica malas condiciones de ventilación de los contaminantes emitidos en la zona. Además, las direcciones de los vientos medidas en dichas estaciones para el periodo del 20 al 23 de agosto mostraron que los vientos se movían desde la zona industrial hacia Quintero, desde la madrugada hasta el mediodía. Se verificó también que la atmósfera cerca del suelo se fue estabilizando progresivamente a partir del 18 de agosto, alcanzándose el 21 de agosto una fuerte inversión térmica a aproximadamente 400 m sobre el suelo, impidiendo la mezcla vertical de contaminantes en la zona, esta condición mejoró posteriormente el 22 de agosto y el 23 de agosto se volvió a condiciones similares a las del 18 de octubre. En resumen, las malas condiciones de dispersión en los días 20 a 22 de agosto promovieron altas concentraciones de los contaminantes emitidos en la zona en esas fechas.

Para simular la distribución espacial de la dispersión de emisiones atmosféricas en la zona de estudio, se empleó el modelo de dispersión CALPUFF (versión 7). La meteorología fue construida con el modelo meteorológico CALMET, usando datos observados superficiales de meteorología (vientos, temperatura, humedad, cobertura de nubes) de 10 estaciones de monitoreo y datos en altura generados por un modelo meteorológico global (NCEP/NCAR), toda esta información está disponible en dominio público. Finalmente, el modelo de dispersión se aplicó en una grilla de 250 m de resolución horizontal, de manera de poder capturar adecuadamente la complejidad del terreno (variabilidad espacial del uso del suelo) en la zona de Quintero - Puchuncaví. Con esta metodología, el modelo de dispersión incluye las condiciones meteorológicas observadas en la zona de Quintero del 20 al 23 de agosto.



Para evaluar el desempeño del modelo de dispersión CALPUFF, se ha modelado todas las fuentes emisoras de SO₂ en la zona de estudio (Quintero-Puchuncaví) y se ha comparado dichas modelaciones con las observaciones de las estaciones de monitoreo de calidad del aire en la misma zona: Los Maitenes, Quintero y Centro Quintero. La información de las emisiones de SO₂ de la Central Termoeléctrica Ventanas y las de la chimenea de la Planta de Ácido de la fundición Ventanas se conocen por el monitoreo continuo de ellas, con resolución temporal horaria. Las emisiones de la chimenea principal de la fundición Ventanas se conocen a partir de los balances de masa con resolución mensual. Se modelaron las emisiones fugitivas de la nave de la Fundición Codelco Ventanas, expresándolas como una fuente de línea con boyancia, de acuerdo a la recomendación de los desarrolladores de CALPUFF. Las emisiones fugitivas se estimaron a partir de los balances de masa disponibles para los procesos de la fundición.

Se hizo un análisis global (para todo el año 2018) del desempeño del modelo CALPUFF, comparando los patrones temporales para cada estación de monitoreo SINCA. Utilizando indicadores estadísticos recomendados en la literatura técnica, se obtuvo que el modelo CALPUFF es capaz de representar adecuadamente las concentraciones de SO₂ observadas en las estaciones de la red del monitoreo del Ministerio del Medio Ambiente, especialmente en la estación Quintero entre la medianoche y el mediodía. Así, el modelo CALPUFF es capaz de representar el transporte, desde la medianoche hasta el mediodía en los días 20 a 23 de agosto, de las emisiones en el sector industrial de Quintero-Puchuncaví hacia la zona de Quintero.

A continuación, se utilizó el modelo de dispersión CALPUFF para modelar las emisiones evaporativas de compuestos orgánicos volátiles (COV) provenientes del sistema de separadores API de ENAP. Este sistema de separadores por gravedad recibió el drenado de la fase acuosa decantada de un estanque de almacenamiento de crudo a partir del 17 de agosto de 2018. Dicha descarga del estanque contenía agua con hidrocarburos disueltos en ella, además de sulfuro de hidrógeno (H₂S) y formaldehído (HCHO); éste último compuesto se utiliza como sustancia secuestrante del H₂S en operaciones de descarga de petróleo crudo desde barcos a estanques de almacenamiento de crudo como los de ENAP. Las emisiones de los separadores API se estimaron usando la metodología recomendada por la Agencia de Protección del Ambiente de EEUU (U.S. EPA) para este tipo de unidades de separación usando la planilla de cálculo "*refinery_wastewater_emissions_tool_2011*".

Al realizarse la modelación de las emisiones de los citados estanques API de ENAP, se encuentra que ellas alcanzan la zona de Quintero desde la medianoche hasta la mañana de los días 21 a 23 de agosto, extendiéndose esta condición meteorológica hasta el mediodía. Los valores modelados para las concentraciones ambientales de HCHO en la zona de Quintero superaron los niveles que pueden

Servicio de modelación de calidad del aire para la zona de Quintero-Puchuncaví

Informe Final

Página 59 de 61

Código V01: FI-A.03-DSA



causar síntomas en la salud de las personas, mientras que para el caso del H₂S hubo excedencias al umbral olfativo de este compuesto. Como dichos umbrales se han establecido en estudios de salud ocupacional con adultos, la población más sensible expuesta a estos compuestos debe haber presentado síntomas: niños y adultos mayores principalmente. No hay otras fuentes de HCHO ni de H₂S en la zona industrial, hacia el norte de Quintero, que fue la dirección desde donde sopló el viento en las noches y mañanas del 21 al 23 de agosto.

Al modelarse las concentraciones de COV aromáticos provenientes de las emisiones de los separadores API de ENAP, se constata que las plumas de las emisiones pasan por la zona urbana de Quintero desde la madrugada hasta el mediodía de los días 21 a 23 de agosto. Los mayores niveles corresponden al benceno, seguido de los otros compuestos aromáticos (toluenos, xilenos, etilbenceno). No se encuentran excedencias del umbral olfativo del benceno en la zona urbana de Quintero, aunque hay que tener presente (ver sección 7.1.2) que las emisiones podrían ser mayores en caso que en el drenaje de la fase acuosa del estanque de crudo T5111, enviada a los separadores API de ENAP, esos compuestos aromáticos hubieran tenido concentraciones en fase acuosa iguales a sus respectivas solubilidades en agua, las que son bastante superiores a las concentraciones empleadas en el cálculo de las emisiones (Tabla 3): desde 2,5 veces más para benceno y tolueno, 5 veces para xilenos y 5,6 veces para etilbenceno. Esta es una incertidumbre que no es posible cuantificar, puesto que las mediciones disponibles, realizadas el 24 de agosto en el separador API, se hicieron cuando ya se había descargado más corrientes (descarga de aguas provenientes de pruebas hidrostáticas y agua con restos de crudo, asociada a la mantención de los estanques T5109 y T5104) a los separadores API de ENAP. Si se usaran esos mayores valores de emisiones de COV aromáticos, las concentraciones modeladas habrían superado el nivel de umbral olfativo en Quintero.

Además, se modelaron las restantes emisiones de COV en la zona, provenientes de los estanques de las empresas COPEC y OXIQUM (usando la metodología TANKS de la EPA de EEUU), así como las emisiones de COV de la central termoeléctrica Ventanas de AES Gener. Se asumió que todas las emisiones de COV de COPEC y OXIQUM correspondían a compuestos aromáticos (supuesto pesimista). Se concluyó que todas estas fuentes evaporativas aportan menos del 5% a las concentraciones totales de COV (aromáticos) modeladas en Quintero, y que esas fuentes no emiten ni HCHO ni H₂S. Luego, las concentraciones modeladas en Quintero se explican de manera ampliamente mayoritaria por las emisiones de ENAP.



En resumen, se ha encontrado que las emisiones de ENAP causaron una exposición poblacional a una mezcla de contaminantes (HCHO, H₂S, COV aromáticos) con distintas concentraciones, en la zona de Quintero, en la noche y mañana de los días 21 a 23 de agosto de 2018.

Por lo tanto, se ha establecido una relación de causalidad entre: i) el trasvasije de agua decantada en estanques de almacenamiento de petróleo crudo de ENAP a los estanques separadores API de la misma empresa, ii) las subsiguientes emisiones de HCHO, H₂S y COV aromáticos desde dichos estanques al aire, iii) la dispersión de esas emisiones hacia la zona de Quintero en las noches y mañanas del 21 al 23 de agosto, y iv) los aumentos en consultas médicas en Quintero entre el 21 y 23 de agosto. No hay otras fuentes emisoras que puedan explicar dichos efectos en salud, puesto que: a) no hay otras fuentes que emiten HCHO ni H₂S en la zona al norte de Quintero, b) las emisiones de COV provenientes de las otras empresas que almacenan COV aportan menos del 5% de las concentraciones totales modeladas de COV en la zona de Quintero durante los episodios de aumentos de consultas médicas entre el 21 y 23 de agosto.