

Universidad Técnica Federico Santa María

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AMBIENTAL



‘Modelación de dispersión de emisiones de SO₂ de Refinería Aconcagua’

Joshua Alexie Tobar Gutiérrez

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL AMBIENTAL

Profesor Guía
Daniel Ramírez Livingston

Ingeniera Correferente
Laura Guzmán Cortez

Agosto de 2022
Valparaíso, Chile

Agradecimientos

Primero quiero agradecer a mi amado Dios, por darme la salvación por medio de Jesús y brindarme la posibilidad de estudiar y maravillarme al conocer su inmensidad, creatividad, complejidad reflejada en la creación.

‘Solo una vida, pronto pasará, sólo lo que es hecho por Cristo durará’

C.T. Studd

A mi amada esposa Camila que su amor, dulzura, paciencia, mimos, risas, apoyo e inspiración me permitió llevar a cabo este trabajo. Eres mi mayor tesoro y le pido a Dios que nos conceda muchos años juntos para conocernos y amarnos en la calma y las adversidades.

A mi amada Madre por sus horas de trabajo, sueño, sacrificio, esfuerzos y amor incondicional, tus enseñanza, valores y ejemplo me anima día a día a ser un mejor hombre. Tuyo es este logro.

A mi amado Padre por su apoyo y sacrificios en el mar, eres un ejemplo de sacrificio y esfuerzo.

A mi abuela ‘Feli’, aunque ya no estés con nosotros recordarte es una gran fuente de alegría.

A mis compañeros de carrera, quienes fueron grata compañía durante las largas noches de estudio y sacrificio.

A mi familia ‘Lepe’ por hacerme parte de ellos, por su apoyo y permitirme disfrutar de tan gratos momentos junto a ustedes.

A Laura por darme la oportunidad de realizar este trabajo junto a ella y su gran paciencia conmigo.

Resumen ejecutivo

En este estudio se realizó un análisis de distintos modelos de dispersión de contaminantes como Gauss, Aermod y Calpuff para ENAP Refinería Aconcagua. Con el propósito de brindar una herramienta que permita detectar rápidamente las variaciones en la calidad del aire en la zona urbana de Concón. Para esto se hizo un exhaustivo análisis de las fuentes de emisión de dióxido de azufre, obteniendo un total de 28 fuentes de emisión divididas en Hornos, Calderas, Antorchas, Plantas de Azufre, Cogeneradora, Cracking catalítico y una planta de Ácido Sulfúrico. Para estas fuentes se determinó la velocidad de salida de los gases, temperatura de salida y las dimensiones creando una base de datos de emisiones en Sistema Airviro, con la que se realizó una serie simulaciones para los modelos anteriormente mencionados, obteniendo un error que varía entre 30 a 50% para Calpuff, 90% para Gauss y 90% para Aermod. Siendo Calpuff el modelo de dispersión que mejor se adapta a las condiciones de la empresa.

Una vez escogido Calpuff como modelo se realizaron distintos estudios que determinaron que a mayor altura existe una menor concentración de contaminantes (mejor dispersión de contaminantes), las plantas de azufre son la mayor fuente de emisión de SO_2 y que mientras mayor sea la concentración de azufre en el fuel gas mayor serán las inmisiones de dióxido de azufre medido en las estaciones de calidad del aire. La importancia de este modelo es que brinda un primer acercamiento a los modelos tipo Puff para ENAP Refinería Aconcagua, los cuales presentan un error menor a los modelos Gaussianos utilizados en la actualidad, entregando una mayor claridad al momento de estudiar las emisiones de la empresa. Además, se han realizado una serie sugerencias como la compra de datos de un pronóstico meteorológicos de mayor calidad y resolución, mejorar las condiciones de la estación meteorológica de la empresa, instalación de sensores que permitan obtener datos en serie de tiempo para las antorchas y el uso de algoritmos de Machine Learning. También, se hizo la conexión a un pronóstico meteorológico gratuito para realizar a futuro una simulación que pronostique la calidad del aire de forma gratuita e incorporaron a la base de datos la información necesaria para la aplicación de la altura y diámetro efectivo como ajuste para la modelación. Por último, se tiene que al implementar estas recomendaciones y configuraciones el error de la simulación disminuiría, pudiendo ser validada como herramienta de corrección y predicción para dar cumplimiento a la normativa primaria de calidad del aire.

Índice de contenido

Agradecimientos	2
Resumen ejecutivo	3
Índice de contenido.....	4
Índice de tablas.....	7
Índice de figuras.....	8
Índice de gráficas	10
1.Introducción y objetivos.....	11
1.1 Introducción	11
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo general	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	12
2. Antecedentes	13
2.1 Información general de la empresa	13
2.1.1 Perfil de la empresa	13
2.1.2 Ubicación de la empresa	13
2.1.3 Materia prima y principales productos	15
2.2 Descripción del proceso de refinación	16
2.2.1 Topping I y II (fraccionamiento primario)	17
2.2.2 Plantas de vacío (fraccionamiento al vacío).....	18
2.2.3 Reformación catalítica.....	19
2.2.4 Coquización retardada.....	19
2.2.5 Cracking catalítico.....	20
2.2.6 Hidrocracking.....	21
2.3 Dióxido de azufre (SO ₂).....	21
2.3.1 Características del dióxido de azufre.....	21
2.3.2 Origen del dióxido de azufre	21
2.3.3 Reacciones del dióxido de azufre.....	21
2.3.4 Riesgos para la salud y el medioambiente.....	22
2.3.5 Legislación	22
3. Sistema de modelación ‘Airviro’	24
3.1 Módulo presentation.....	25
3.2 Módulo EDB (Base de datos de emisiones).....	28

3.3 Módulo dispersion.....	29
4. Inventario de fuentes de emisiones	30
4.1 Listado y coordenadas de las fuentes de emisión.....	30
4.2 Características de las fuentes de emisión	32
4.2.1 Antorchas	32
4.2.2 Hornos	33
4.2.3 Calderas.....	35
4.2.4 Plantas de azufre.....	36
4.2.5 Cracking catalítico.....	36
4.2.6 Planta de ácido sulfúrico	36
4.2.7 Cogeneradora	37
5. Dominio del estudio	37
6. Base de datos de emisiones (EDB)	38
7. Elección de modelo de dispersión.....	43
7.1 Modelo de dispersión de Gauss.....	43
7.2 Modelo de dispersión de Aermod	44
7.3 Modelo de dispersión Calpuff	45
7.4 Comparación entre modelos.....	46
7.5 Resultados de comparación de modelos de dispersión	50
8. Estación meteorológica	50
8.1 Características de la estación meteorológica.....	50
8.2 Estabilidad e inestabilidad atmosférica	54
9. Análisis de Fuel Gas.....	59
10. Análisis de altura de modelación	65
11. Análisis según tipo de fuente de emisión	68
11.1 Antorchas	68
11.2 Hornos	70
11.3 Calderas.....	73
11.4 Plantas de azufre.....	75
11.5 Cogeneradora	78
11.6 Cracking catalítico.....	80
12 Sugerencias y recomendaciones.....	86
12.1 Pronóstico de calidad del aire.....	86

12.2 Estación meteorológica	90
12.2.1 Ubicación estación meteorológica.....	90
12.2.2 Sensores de la estación meteorológica	93
12.3 Mejorar el monitoreo de las antorchas	95
12.4 Machine learning.....	96
12.5 Diámetro y altura efectiva de las antorchas (Flare).....	97
12.5.1 Altura efectiva	98
12.5.2 Diámetro efectivo	99
12.5.3 Flujo de flotabilidad	100
13. Conclusión.....	101
14. Referencias.....	103

Índice de tablas

Tabla 1 Niveles de emergencia expresados como concentración de 1 hora de dióxido de azufre ..	24
Tabla 2 Listado y coordenadas de fuentes de emisión de dióxido de azufre	30
Tabla 3 Datos EDB Antorchas	33
Tabla 4 Datos EDB Hornos	34
Tabla 5 Datos EDB Calderas	35
Tabla 6 Datos EDB de plantas de azufre.....	36
Tabla 7 Ventajas y desventajas del modelo de dispersión de Aermod.....	44
Tabla 8 Correlaciones para estabilidad atmosférica de Pasquill-Gifford	57
Tabla 9 Categorías de estabilidad y sus factores de corrección correspondientes	58
Tabla 10 Fechas de concentración de azufre en fuel gas e inmisiones de SO ₂ [ug/m ³] 4 a.m.	59
Tabla 11 Fechas de concentración de azufre en el fuel gas e inmisiones de SO ₂ [ug/m ³] 5 a.m. ...	60
Tabla 12 Fechas de concentración de azufre e inmisión de SO ₂ [ug/m ³] 6 a.m.	61
Tabla 13 Fechas de concentración de azufre en fuel gas e inmisión SO ₂ [ug/m ³] 7 a.m.....	62
Tabla 14 Fecha de concentración de azufre en el fuel gas e inmisión [ug/m ³] 8 a.m.	63
Tabla 15 Resultados simulaciones a distintas alturas	67
Tabla 16 Resultados modelación de Antorchas	68
Tabla 17 Resultado simulaciones hornos	70
Tabla 18 Resultado simulaciones de calderas	73
Tabla 19 Resultado de simulaciones de plantas de azufre	75
Tabla 20 Resultado simulaciones cogeneradora.....	78
Tabla 21 Resultados simulaciones cracking catalítico.....	80
Tabla 22 Tags poder calorífico y flujo de antorchas.....	99

Índice de figuras

Figura 1: Ubicación de ENAP Refinería Aconcagua	14
Figura 2: Ubicación detallada de ENAP Refinería Aconcagua	14
Figura 3: Detalle de ENAP Terminal Marítimo	15
Figura 4: Productos que entrega ENAP	16
Figura 5: Proceso productivo ENAP Refinería Aconcagua.....	17
Figura 6: Destilación de los Topping I Y II.....	18
Figura 7: Torres de vacío	18
Figura 8: Reformación catalítica.....	19
Figura 9: Torres Petropower	20
Figura 10: Cracking catalítico	20
Figura 11 Composición del dióxido de azufre	21
Figura 12 Pantallazo de datos almacenados en serie de tiempo, Módulo Presentation	26
Figura 13 Pantallazo de datos almacenados en macros, Módulo Presentation	26
Figura 14 Pantallazo herramientas estadísticas, Módulo presentation.....	27
Figura 15 Pantallazo de salidas de datos, módulo presentation	27
Figura 16 Pantallazo tipo de gráficos, módulo presentation	28
Figura 17 Listado de modelos incorporados en Airviro	29
Figura 18: Mapa de fuentes de SO ₂	32
Figura 19 Dominio de modelación y grilla.....	37
Figura 20 Dominio de modelación y extremos	38
Figura 21 Pantallazo modulo EDB al incorporar una fuente	39
Figura 22 Pantallazo modulo EDB, configuración de chimenea.....	39
Figura 23 Pantallazo modulo EDB, agregar serie de tiempo o macro.....	40
Figura 24 Pantallazo creación EDB, clave de búsqueda	41
Figura 25 Pantallazo módulo dispersion con todas las fuentes de emisión	42
Figura 26 Clasificación de fuente de emisiones	42
Figura 27 Mapa estaciones de calidad del aire	47
Figura 28 Ubicación estación meteorológica ENAP Refinería Aconcagua	51
Figura 29 Torre meteorológica ENAP Refinería Aconcagua	52
Figura 30 Sensor de temperatura a 2 metros de altura, estación meteorológica	53
Figura 31 Zona baja estación meteorológica	54
Figura 32 Tipos de plumas.....	56
Figura 33 Simulación 2022-03-30 01:00, 2 metros de altura	65
Figura 34 2022-03-30 01:00, 20 metros de altura	65
Figura 35 Simulación 2022-03-30 01:00, 40 metros de altura	66
Figura 36 Simulación 2022-03-30 01:00, 60 metros de altura	66
Figura 37 Modelación Antorchas 2022-03-02 07:00.....	68
Figura 38 Modelación Antorchas 2022-03-02 08:00.....	69
Figura 39 Modelación Antorchas 2022-03-03 02:00.....	69
Figura 40 Modelación Antorchas 2022-03-03 05:00.....	70
Figura 41: Modelación Hornos 2022-03-02 07:00	71

Figura 42: Modelación Hornos 2022-03-02 08:00	71
Figura 43: Modelación Hornos 2022-03-03 02:00	72
Figura 44: Modelación Hornos 2022-03-03 05:00	72
Figura 45: Modelación Calderas 2022-03-02 07:00	73
Figura 46: Modelación Calderas 2022-03-02 08:00	74
Figura 47: Modelación Calderas 2022-03-03 02:00	74
Figura 48: Modelación Calderas 2022-03-03 05:00	75
Figura 49 Modelación plantas de azufre 2022-03-03 02:00	77
Figura 50 Modelación plantas de azufre 2022-03-03 05:00	77
Figura 51 Modelación cogeneradora 2022-03-02 07:00.....	78
Figura 52 Modelación cogeneradora 2022-03-02 08:00.....	79
Figura 53 Modelación cogeneradora 2022-03-03 02:00.....	79
Figura 54 Modelación cogeneradora 2022-03-03 05:00.....	80
Figura 55 Modelación cracking catalítico 2022-03-02 07:00	81
Figura 56 Modelación cracking catalítico 2022-03-02 08:00	81
Figura 57 Modelación cracking catalítico 2022-03-03 02:00	82
Figura 58 Simulación cracking catalítico 2022-03-03 02:00	82
Figura 59 Inmisiones de SO ₂ [ug/m ³] de las plantas de azufre captadas por las estaciones Concón, Junta de vecinos y UMA	83
Figura 60 Inmisiones de SO ₂ [ug/m ³] de las antorchas captadas por las estaciones Concón, Junta de vecinos y UMA.....	83
Figura 61 Inmisiones de SO ₂ [ug/m ³] de las calderas captadas por las estaciones Concón, Junta de vecinos y UMA.....	84
Figura 62 Inmisiones de SO ₂ [ug/m ³] de los hornos captadas por las estaciones Concón, Junta de vecinos y UMA.....	84
Figura 63 Inmisiones de SO ₂ [ug/m ³] de la cogenerada captadas por estaciones Concón, Junta de Vecinos y UMA	85
Figura 64 Inmisiones de SO ₂ [ug/m ³] de cracking catalítico captadas por las estaciones Concón, Junta de Vecinos y UMA.....	85
Figura 65 Pronóstico para 8 días de Openweather	86
Figura 66 Base de datos pronóstico OpenWeather	87
Figura 67 Estaciones de predicción meteorológica.....	87
Figura 68 Espacio mínimo de la torre meteorológica	90
Figura 69 Espacio recomendado de la estación meteorológica.....	91
Figura 70 Obstrucciones torre meteorológica	91
Figura 71 Zona baja de la estación meteorológica.....	92
Figura 72 Panorámica de Refinería Aconcagua.....	93
Figura 73 Sensor de temperatura	94
Figura 74 Esquema del diámetro y altura efectiva de las antorchas	98

Índice de gráficas

Gráfica 1 Gráfica de dióxido de azufre, módulo dispersion	25
Gráfica 2 Gráfica de frecuencia - Estación Concón - Condiciones de Verano	47
Gráfica 3 Gráfica de frecuencias - Estación Junta de Vecinos - Condiciones de Verano	48
Gráfica 4 Gráfica de frecuencias - Estación UMA - Condiciones de Verano	48
Gráfica 5 Gráfico de frecuencias - Estación Concón - Condiciones de invierno.....	49
Gráfica 6 Gráfica de frecuencias - Estación Junta de Vecinos - Condiciones de Invierno.....	49
Gráfica 7 Gráfica de frecuencias - Estación UMA - Condiciones de Invierno.....	50
Gráfica 8 Concentración de azufre en Fuel Gas vs Inmisiones de SO ₂ [ug/m ³] a las 4 a.m.	60
Gráfica 9 Concentración de azufre en Fuel Gas vs inmisiones de SO ₂ [ug/m ³] 5 a.m.	61
Gráfica 10 Concentración de azufre en fuel gas vs inmisión de SO ₂ [ug/m ³] 6 a.m.	62
Gráfica 11 Concentración de azufre en Fuel Gas vs inmisión de SO ₂ [ug/m ³] 7 a.m.	63
Gráfica 12 Concentración de azufre en fuel gas vs inmisión de SO ₂ [ug/m ³] 8 a.m.	64
Gráfica 13 Comparación de datos de temperatura de la estación meteorológica vs estación pronóstico meteorológico.....	88
Gráfica 14 Comparación dirección del viento estación meteorológica vs estación pronóstico meteorológico	89
Gráfica 15 Comparación velocidad del viento estación meteorológica vs estación pronóstico meteorológico	89

1.Introducción y objetivos

1.1 Introducción

El dióxido de azufre (SO_2) es uno de los gases contaminantes más contingentes en la Región de Valparaíso, debido a los peak de contaminación de SO_2 que han ocurrido en las comunas de Quintero, Puchuncaví y Concón. Esto ha llevado a un aumento en la fiscalización por parte de Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). Con el propósito de dar cumplimiento a los requisitos ambientales, medidas de mitigación y restauración presentes en el punto 7.14 de la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) 159/2003, la cual busca desarrollar un sistema que permita detectar de manera rápida las variaciones en la calidad del aire de la zona urbana de Concón, el cual se encontrará en línea recogerá la información desde la red de monitoreo existente en la sala de control de la Refinería. Con esto se podrán tomar medidas correctivas para dar cumplimiento a los límites de SO_2 establecidos en la normativa primaria de calidad del aire.

En este contexto, en el siguiente trabajo se muestra una metodología para la modelación de dispersión de emisiones de las fuentes puntuales de dióxido de azufre de ENAP Refinería Aconcagua. Para esto se ha realizado un estudio y recopilación de las fuentes de emisión, sus dimensiones y emisiones en forma de series de tiempo, con el fin de evaluar 3 modelos de dispersión (Gauss, Aermód y Calpuff) y determinar el que se adapta mejor a las condiciones de la Refinería al comparar los resultados con los datos proporcionados por las estaciones de calidad del aire.

Una vez determinado el modelo se conectará a un pronóstico meteorológico, con el fin de obtener un pronóstico de calidad del aire preventivo y una vez estudiados sus resultados se establecerán propuestas para mejorar la calidad de la modelación.

La intención del autor es brindar a ENAP Refinería Aconcagua un modelo base de dispersión de SO_2 , con el fin de que en un futuro se puedan implementar mejoras que permitan validarlos para ser utilizado como herramienta para dar cumplimiento a las normas de calidad del aire.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Realizar una modelación de dispersión de emisiones de SO_2 en ENAP Refinería Aconcagua.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar un estudio para determinar las fuentes de emisiones de SO_2 de la empresa.
- Analizar la calidad de los datos y verificar el estado de los sistemas de monitoreo de las fuentes de emisión de SO_2 .
- Determinar cuál es el modelo matemático de dispersión que se adapta de mejor manera al sector donde se ubica la Refinería Aconcagua.
- Realizar una comparación de los resultados de la modelación con la información proporcionada por las estaciones de calidad del aire.
- Establecer propuestas para mejorar la calidad de los resultados de la modelación de dispersión.

2. Antecedentes

2.1 Información general de la empresa

2.1.1 Perfil de la empresa

La Empresa Nacional de Petróleo, ENAP, es una empresa estatal líder en Chile, cuyo propósito es la producción, refinación y comercialización de hidrocarburos y sus derivados, cumpliendo un rol clave en el abastecimiento de la matriz energética del país.

ENAP cuenta con operaciones en el extranjero que incluyen la producción de crudo y gas en Argentina, Ecuador y Egipto. Mientras que, en Chile se tienen las siguientes Líneas de Negocios:

1.Línea de Negocios de Refinación y Comercialización (E&C): La Refinerías Aconcagua, Biobío y Gregorio operan bajo esta línea, debido a que procesan crudo y lo transforman en combustible.

2.Línea de Negocios de Exploración y Producción (E&P): Esta línea gestionar la búsqueda y producción de hidrocarburos. Esta tiene a su cargo la licitación y suscripción de Contratos Especiales de Operación Petrolera (CEOP), la cual se encarga de gestionar la asociación entre ENAP con empresa del rubro para la explotación de bloques en la Región de Magallanes y de ella dependen las operaciones de la filial internacional, Sipetrol.

ENAP Refinería Aconcagua, se ubica en la comuna de Concón, Región de Valparaíso. Mientras que su casa Matriz se ubica en la Región Metropolitana, en donde se realizan las labores de administración general.

2.1.2 Ubicación de la empresa

ENAP Refinería Aconcagua, se ubica en las costas de la quinta región cerca de la rotonda de Concón, específicamente en Avenida Borgoño 25777 (Figura 1 y 2). Esta cuenta con 2 accesos, el principal se encuentra llegando a la rotonda de Concón por Avenida Borgoño, por la parte posterior, ingresando por la calle 2 norte, por donde entran los buses se acercamiento y el personal y el segundo ingreso se encuentra en la parte posterior de la empresa y es utilizada como vía de evacuación en situaciones de emergencia. Además, la empresa tiene una segunda localidad ubicada en Quintero (Figura 3), en donde se realiza la descarga de combustible que llega por barco para abastecer a Refinería Aconcagua.



Figura 1: Ubicación de ENAP Refinería Aconcagua

Fuente: Google Maps



Figura 2: Ubicación detallada de ENAP Refinería Aconcagua

Fuente: Google Maps



Figura 3: Detalle de ENAP Terminal Marítimo

2.1.3 Materia prima y principales productos

La principal materia prima de la empresa corresponde al petróleo crudo, el cual proviene tanto del mercado nacional como internacional. Este es sometido a un proceso de refinación que permite producción de los productos que entrega ENAP a su diversa gama de clientes, los cuales se dividen principalmente en 3 categorías.

1.Productos combustibles: Gas licuado, gasolinas (93 y 97), kerosenes, petróleos Diesel, petróleos combustibles y coque de petróleo. (“Productos - ENAP Educa - ENAP”)

2.Productos petroquímicos: Etileno y propileno.

3.Productos especiales: Solventes y bases para asfaltos.

Los productos que entrega ENAP se detallan a continuación en la figura 4.

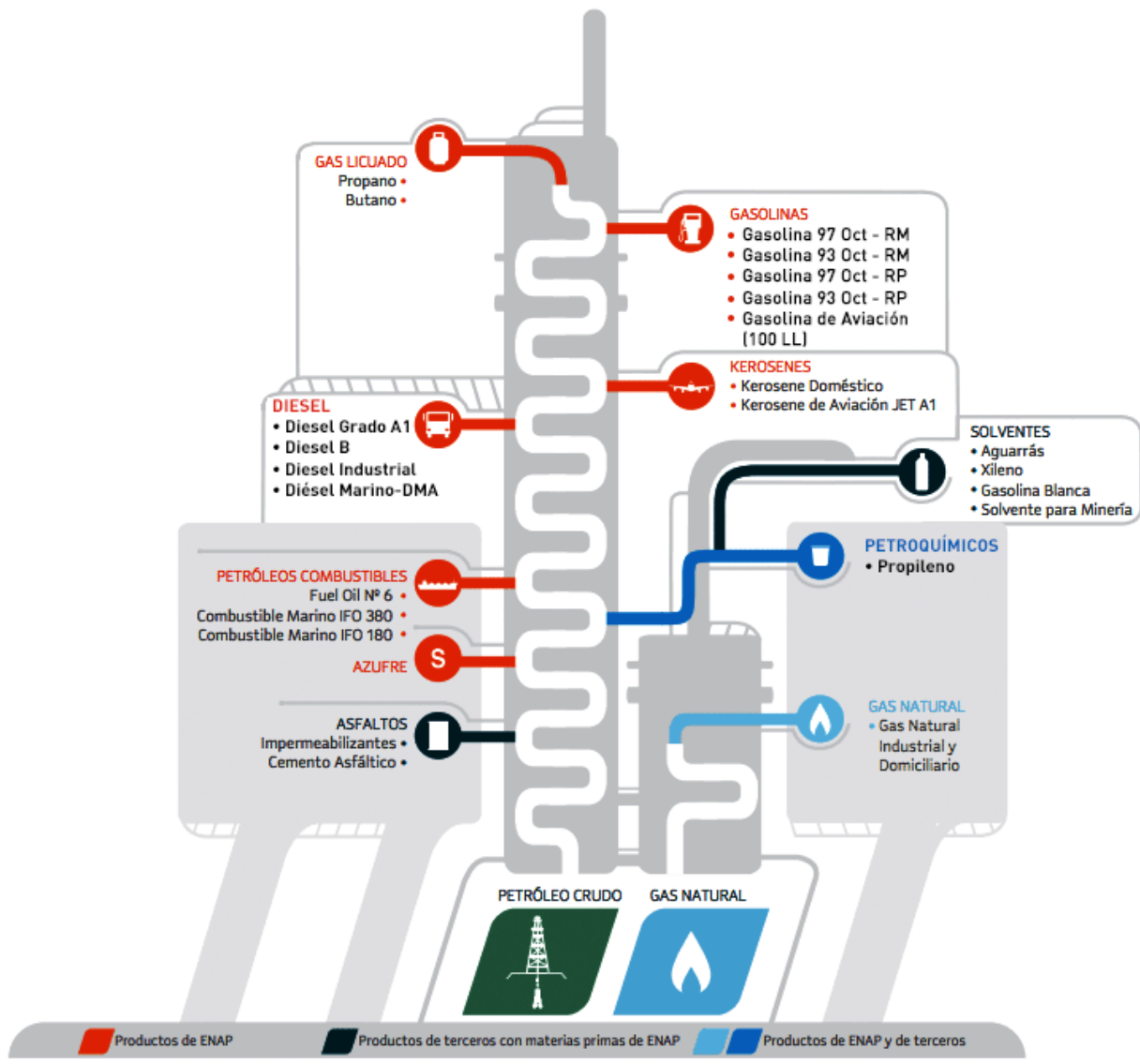


Figura 4: Productos que entrega ENAP

Fuente: enap.cl

2.2 Descripción del proceso de refinación

La refinación es un conjunto de procesos físicos y químicos mediante los cuales se separan y se transforman distintos componentes que conforman el petróleo crudo (“Líneas de Negocio - ENAP”). El objetivo de la empresa es trabajar crudo como materia prima para producir una serie de derivados que se utilizan como energía en diferentes áreas, según la necesidad.

Para llevar a cabo el proceso de refinación ENAP Refinería Aconcagua, Biobío y Gregorio, cuenta con una serie de plantas y unidades, las cuales se detallan a continuación en la figura 5.

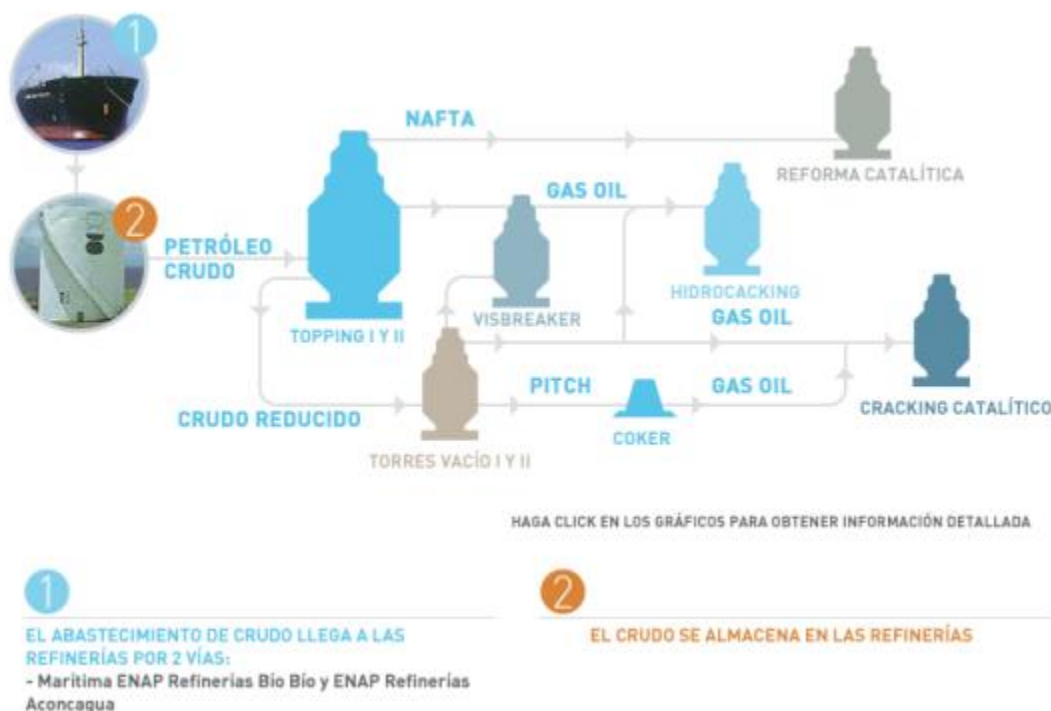


Figura 5: Proceso productivo ENAP Refinería Aconcagua

Fuente: enap.cl

Además, en la empresa existen bombas, compresores, turbinas y otras plantas como las URA que se encargan de transformar el azufre que se extrae del combustible en pellet o insecticidas, pero no están directamente involucradas en el proceso de producción del combustible.

2.2.1 Topping I y II (fraccionamiento primario)

Una vez el crudo llega a la refinería este pasa por el primer filtro libre de agua y otras impurezas para dar inicio al fraccionamiento primario. El crudo es calentado hasta llegar a una temperatura de 370[°C] para separar los hidrocarburos constituyentes del petróleo, por medio de una columna de destilación llamada Topping, teniendo que el gas queda en la parte superior (más volátiles y/o livianos) y el derivado más pesado queda en la parte inferior (menos volátiles). Un ejemplo de esto es que por la parte superior de la torre se obtienen gases como el gas licuado (LGP) y la gasolina, el siguiente grupo es la nafta que se utiliza como carga en otras unidades para poder extraer mejores

derivados de ella, después vienen los productos intermedios como el kerosene y el petróleo diésel, luego está el gas oíl que alimenta las unidades de cracking catalítico e hidrocracking, y en la parte inferior de la torre está el crudo reducido que alimenta las plantas de vacío para obtener un mayor beneficio de los residuos o derivados más pesados, tal como se observa en la figura 6.



Figura 6: Destilación de los Topping I Y II.

Fuente: enap.cl

2.2.2 Plantas de vacío (fraccionamiento al vacío)

La función de las plantas de vacío es evitar la coquificación, es decir, evitar que los hidrocarburos se calcinen y vuelvan quebradizos y porosos. En esta unidad se fracciona el crudo reducido para obtener gas oíl y pitch. El gas oíl es enviado a la planta de cracking catalítico e hidrocracking.



Figura 7: Torres de vacío

Fuente: enap.cl

2.2.3 Reformación catalítica

En este proceso se carga la nafta para ser refinada en gasolina de 97 octano, gases licuados y gases livianos a partir de la nafta proveniente de las columnas de Topping. Además, esta unidad es una de las principales productoras de hidrógeno, el cual es utilizado como materia prima en los procesos de obtención de productos de bajo contenido en azufre. (“Líneas de Negocio - ENAP”) Este proceso se observa en la figura 8.

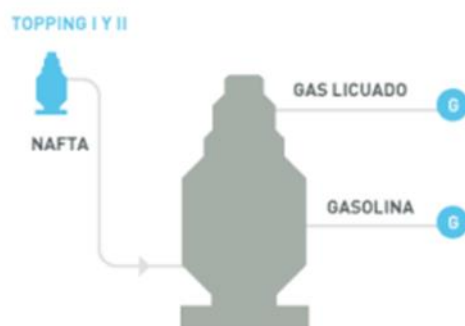


Figura 8: Reformación catalítica

Fuente: enap.cl

2.2.4 Coquización retardada

La planta de coquización retardada es la encargada de volver a refinar lo que viene de las plantas de vacío, para transformarla en gases livianos, gasolina, diésel, gas oíl y coke, para posterior comercialización, lo cual se observa en la figura 9. La capacidad de procesamiento que tiene ENAP para esta planta es de 12.000 barriles diarios.

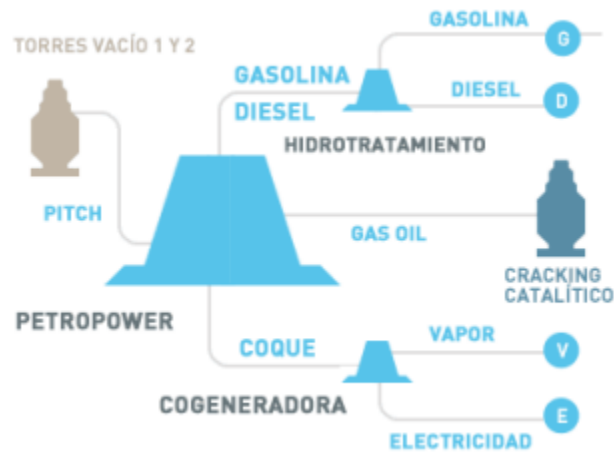


Figura 9: Torres Petropower

Fuente: enap.cl

2.2.5 Cracking catalítico

Es el encargado de mejorar el gas oíl que viene de las torres de vacío y del petropower. Principalmente produce gasolina de alto octanaje, gas licuado, diésel y otros derivados. Este se observa a continuación, en la figura 10

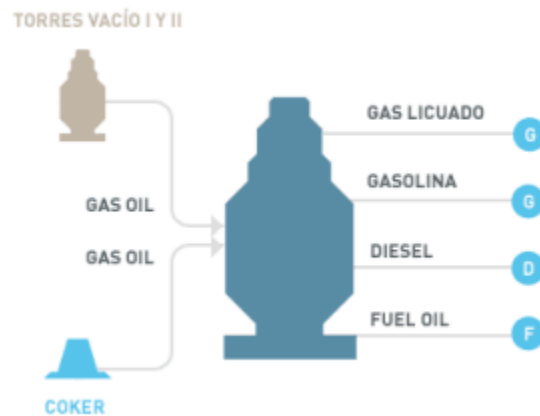


Figura 10: Cracking catalítico

Fuente: enap.cl

2.2.6 Hidrocracking

Esta planta es cargada con el gas oíl de la torre de vacío y en menor cantidad con el proveniente del Coker, para producir diésel bajo en azufre, gasolinas y gases livianos.

2.3 Dióxido de azufre (SO₂)

2.3.1 Características del dióxido de azufre

El dióxido de azufre es un gas incoloro, irritante, de olor penetrante que comienza a percibirse a una concentración entre los 0,3 a 1,4 ppm, siendo totalmente distinguible para una concentración sobre los 3 ppm. Este posee una densidad del doble que la del aire (2,92 kg/m³), no es explosivo, ni inflamable, es estable y es muy soluble en agua formando ácido sulfúrico.

Este gas se compone de un átomo de azufre y 2 de oxígeno, siendo 'SO₂' su fórmula molecular y su fórmula estructural se detalla a continuación en la figura 12.

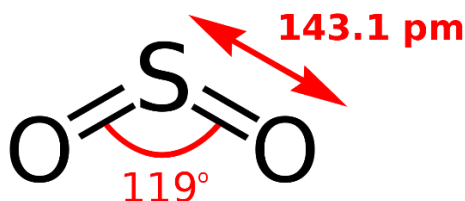


Figura 11 Composición del dióxido de azufre

Fuente: Richtom80

2.3.2 Origen del dióxido de azufre

Este gas principalmente de origen antropogénico (procede de los seres humanos), siendo la principal fuente de emisión de SO₂ es la combustión industrial a alta temperatura de carburantes fósiles que contienen azufre (petróleo y combustibles sólidos) y de la quema de carbón para generar energía en centrales eléctricas. Además, existen fuentes naturales de SO₂ como lo son los volcanes.

2.3.3 Reacciones del dióxido de azufre

El SO₂ es muy soluble en agua y al mezclarse con esta forma ácido sulfúrico. Además, al estar en contacto con la atmósfera se oxida formando sulfatos, los

cuales pasan a formar parte del material particulado ('MP10'). En ambientes húmedos esta forma ácida en forma de aerosoles y contribuye a la formación de material particulado fino (MP2,5). Por último, cabe mencionar que este gas es uno de los principales precursores de lluvia ácida.

2.3.4 Riesgos para la salud y el medioambiente

La exposición al dióxido de azufre y sus derivados, pueden derivar a desarrollar graves riesgos para la salud, debido a que estos ingresan al sistema circulatorio por medio de las vías respiratorias. Algunos de los efectos que puede producir son irritación e inflamación del sistema respiratorio, insuficiencia pulmonar, alteraciones metabólicas, dolor de cabeza, ansiedad, dificultad para respirar, alteraciones psíquicas, edema pulmonar, queratitis, paro cardíaco, entre otros. Se tiene que las personas asmáticas y con enfermedades pulmonares crónicas son las más afectadas por sus efectos. Con respecto a los daños que este gas y sus derivados pueden generar al medioambiente se encuentran daños a la vegetación, degradación de la clorofila, reducción de la fotosíntesis y pérdida de especies.

2.3.5 Legislación

Para prevenir y evitar los riesgos para la salud antes mencionados la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda un nivel máximo de 40 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] para 24 horas como estándar de calidad del aire. Mientras que en Chile se cuenta con el decreto 104, el cual establece la norma primaria de calidad de aire para el dióxido de azufre (SO_2), cuyo objetivo es proteger la salud de las personas de los efectos agudos y crónicos generados por la exposición a dióxido de azufre en el aire. A continuación, se detallarán y resumirán los puntos más relevantes de esta norma extraídos directamente de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

Artículo 3: La norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre como concentración anual será de 60 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], equivalente a 23 ppbv.

Se considerará sobrepasada esta norma, cuando ocurra al menos, una de las siguientes condiciones:

a. El promedio aritmético de 3 años calendario consecutivos de los valores de concentración anual, fuere mayor o igual al valor de la norma que se establece.

b. Si es un año calendario, el valor de la concentración anual, fuera mayor o igual al doble del valor de la norma que se establece.

Artículo 4: La norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre como concentración de 24 horas será de 150 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], equivalente a 57 ppbv.

Se considerará sobrepasada esta norma, cuando ocurra, al menos una de las siguientes condiciones:

a. El promedio aritmético de 3 años calendario sucesivos de los valores del percentil 99 de las concentraciones de 24 horas registrada cada año, fuere mayor o igual al de la norma que se establece.

b. Si en un año calendario, el valor correspondiente al percentil 99 de las concentraciones de 24 horas registradas, fuere mayor o igual al doble del valor de la norma que se establece.

Artículo 5: La norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre como concentración de 1 hora será de 350 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], equivalente a 134 ppbv.

Se considerará sobrepasada esta norma, cuando ocurra, al menos una de las siguientes condiciones:

a. El promedio aritmético de 3 años calendario sucesivos de los valores del percentil 98,5 de las concentraciones de 1 hora registradas cada año, fuere mayor o igual al valor de la norma que se establece. A partir del cuarto año calendario de publicada la norma en el Diario Oficial, se considerará un percentil 99 para evaluar esta condición.

b. Si en un año calendario, el valor correspondiente al percentil 98,5 de las concentraciones de 1 hora registradas, fuere mayor o igual al doble del valor de la norma que se establece. A partir del cuarto año calendario de publicada la norma en el Diario Oficial, se considerará un percentil 99 para evaluar esta condición.

Artículo 7: Los niveles de emergencia tienen por objetivo reducir la exposición de la población en situaciones donde se presentan concentraciones que superan el valor de las normas, y que constituyen un riesgo para la salud de las personas.

Artículo 8: Los siguientes niveles originarán situaciones de emergencia ambiental para dióxido de azufre, expresados como concentración de 1 hora:

Tabla 1 Niveles de emergencia expresados como concentración de 1 hora de dióxido de azufre

Nivel		Niveles de emergencia expresados como concentración de 1 hora de dióxido de azufre en $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ (en ppbv)
1	Alerta	500 – 649 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ (191 – 247 ppbv)
2	Preemergencia	650 – 949 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ (248 – 362 ppbv)
3	Emergencia	950 o superior $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ (363 ppbv o superior)

Fuente: bcn.cl

3. Sistema de modelación ‘Airviro’

El sistema utilizado para realizar las simulaciones es ‘Airviro’, debido a que es el Sistema de Gestión de Calidad de Aire con el cual cuenta ENAP, siendo el sistema modular más completo del mercado, con más de 30 años de experiencia y más de 80 instalaciones alrededor del mundo que lo posiciona por sobre otros Software o aplicaciones de modelación, tales como Vensim, OpenAir-Project, programa Aermod, entre otros.

Algunas de las ventajas que tiene Airviro sobre otros sistemas son:

Fácil acceso: Airviro tiene un interfaz de usuario que permite el acceso y ejecución desde cualquier computadora con conexión a internet. Además, permite visualizar los resultados desde cualquier dispositivo con internet.

Funcionalidad: Permite la creación de servidores personal o servidores en la nube. También, permite gestionar la calidad del aire de forma integral, es decir, incorpora las mediciones, emisiones, modelaciones y estima las fuentes de emisión.

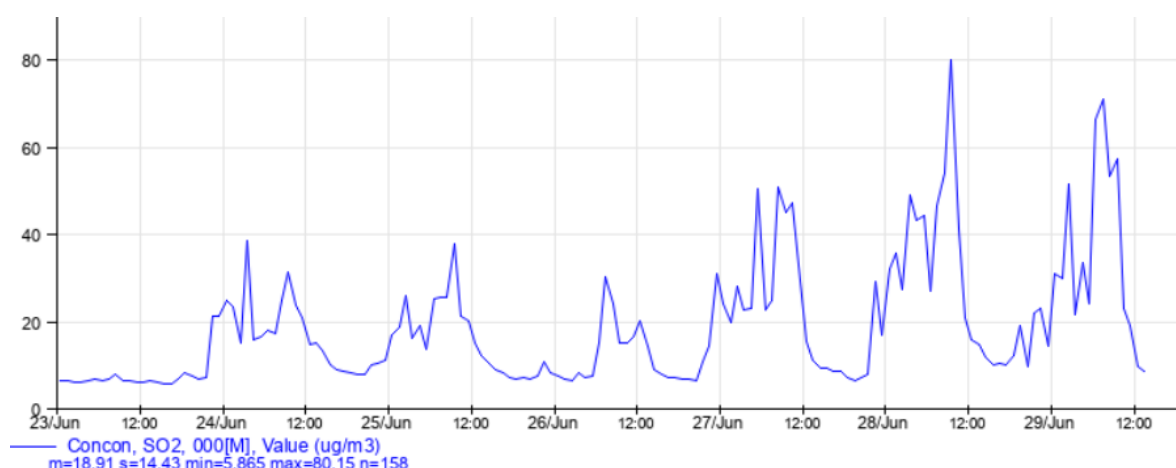
Desempeño: Permite el manejo de gran cantidad de datos, usuarios y plantas. Además, este satisface las demandas de seguridad, rendimiento y estabilidad.

Modular y escalable: Posee distintos módulos, según las necesidades del usuario. Además, permite separar el trabajo en variedad de plantas dentro de un mismo sistema. Por último, confiere los permisos de lectura y escritura para los diferentes módulos por usuario.

Uno de los puntos más fuerte de Airviro es que su funcionalidad integra redes de monitoreo, inventarios de emisión y modelos de dispersión, fácilmente configurables.

3.1 Módulo presentation

El módulo 'Presentation' permite la creación de distintos tipos de gráficos de datos almacenados en series de tiempo y/o macros (figura 13 y 14), con el fin de automatizar tareas. Este cuenta con una serie de herramientas estadísticas que permiten evaluar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente, como se observa en la gráfica 1, la cual es una gráfica de calidad del aire de SO₂ para la estación Concón y la figura 15 que nos muestra las herramientas estadísticas del programa y la posibilidad de visualizar una gran cantidad de series de tiempo o datos al mismo tiempo.



Gráfica 1 Gráfica de dióxido de azufre, módulo dispersion

Fuente: Airviro

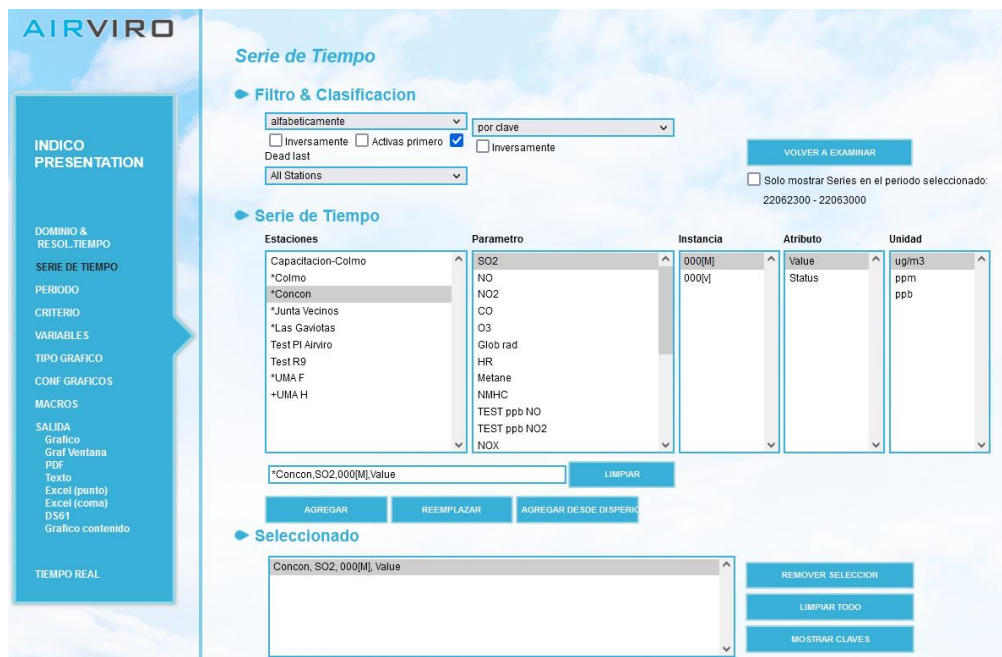


Figura 12 Pantallazo de datos almacenas en serie de tiempo, Módulo Presentation

Fuente: Airviro

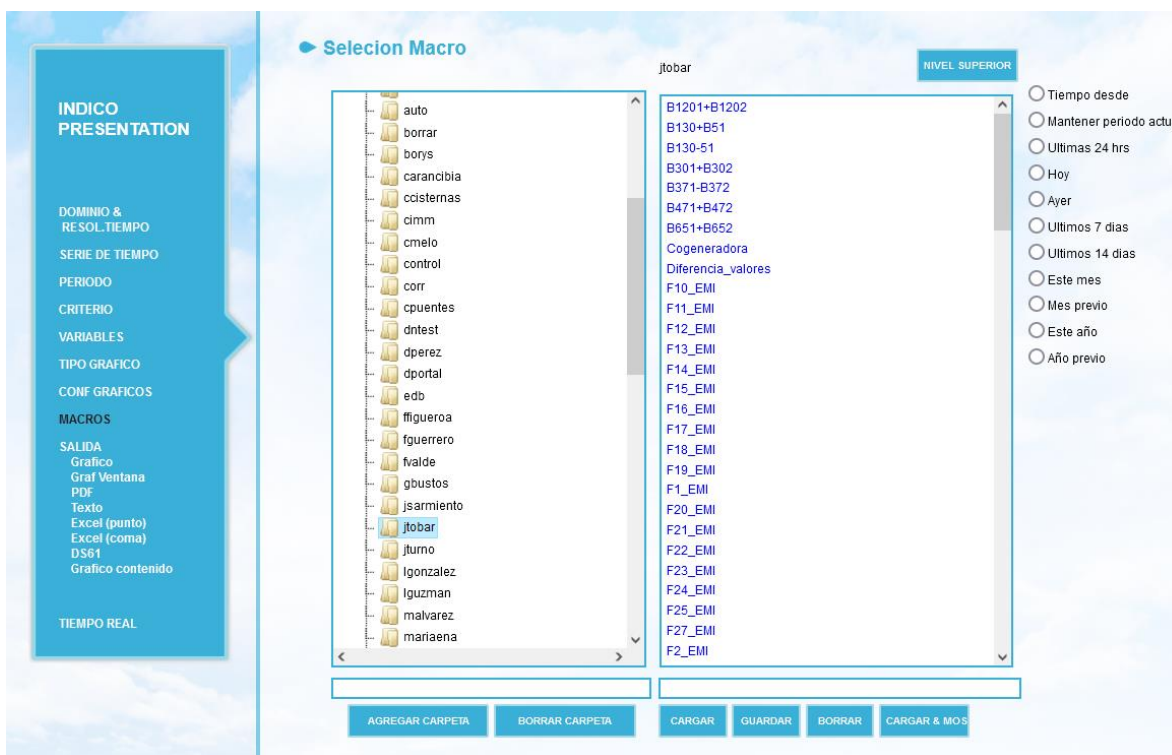


Figura 13 Pantallazo de datos almacenados en macros, Módulo Presentation

Fuente: Airviro



Figura 14 Pantallazo herramientas estadísticas, Módulo presentation

Fuente: Airviro

Por último, este módulo posee una gran cantidad de formas de visualizar los datos de salida, las cuales se detallan en la figura 16 y posee una gran cantidad de tipos de gráficos como se ve en la figura 17.

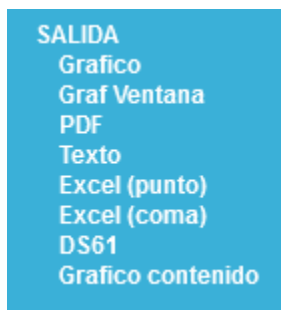


Figura 15 Pantallazo de salidas de datos, módulo presentation

Fuente: Airviro

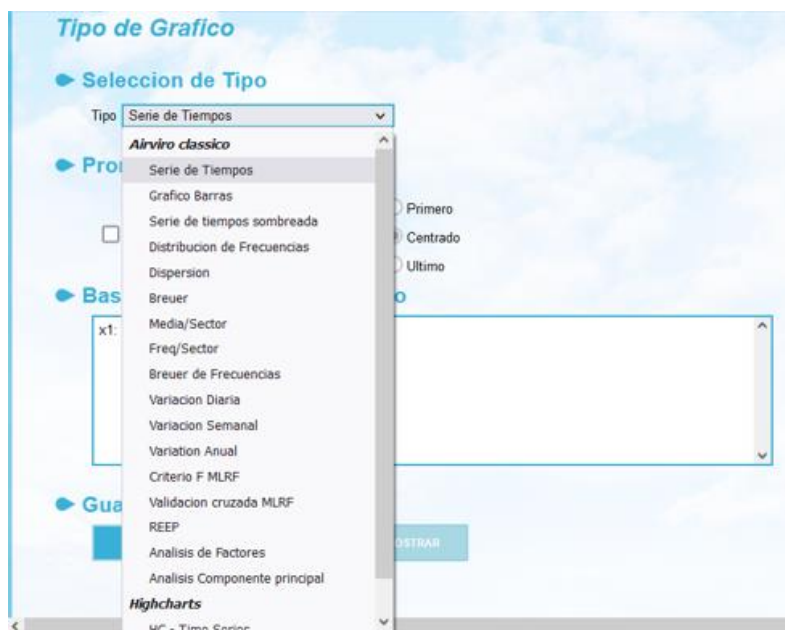


Figura 16 Pantallazo tipo de gráficos, módulo presentation

Fuente: Airviro

3.2 Módulo EDB (Base de datos de emisiones)

Una base de datos de emisiones o EDB es una lista comprensiva de las fuentes de contaminación atmosférica y un estimado de sus emisiones en un área geográfica específica para un intervalo de tiempo específico. La cual sirve para diferenciar fuentes, evaluar el impacto de las fuentes de emisión sobre la salud y el medioambiente y planificar actividades de modo de minimizar impactos. Cabe mencionar que una de las características más importantes de este módulo es que presenta una estructura ordenada para almacenar datos de emisión, pudiendo separar según tipo de fuente (puntual, lineal, móviles y de área) y funciona como base para la creación de modelos de dispersión de gases contaminantes.

3.3 Módulo dispersion

Este módulo utiliza la información de los módulos EDB y presentation, con el fin de realizar cálculos de dispersión de contaminantes por medio de distintos modelos de dispersión. A continuación, en la figura 18 se nos muestra el listado con los modelos que tiene incorporado Airviro en su módulo dispersion.

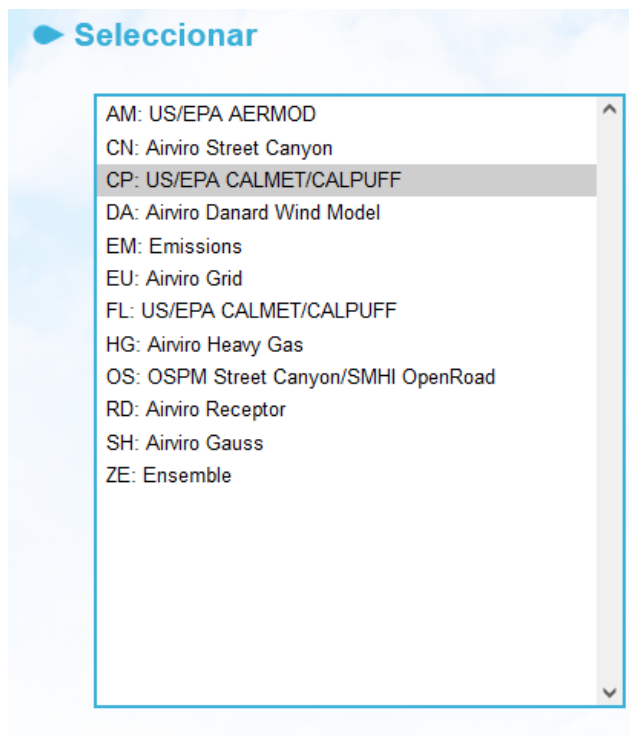


Figura 17 Listado de modelos incorporados en Airviro

Fuente: Airviro

4. Inventario de fuentes de emisiones

Como se mencionó en el punto 2.1.3, ENAP Refinería Aconcagua trataba principalmente con petróleo crudo, el cual es sometido a un proceso de refinación para obtener gasolinas, diésel, kerosene, entre otros.

En este análisis se consideraron todas las fuentes de emisiones de SO₂ de la planta, las cuales se detallan a continuación junto con sus coordenadas, el detalle de los cálculos y sus especificaciones.

4.1 Listado y coordenadas de las fuentes de emisión

Para realizar el listado de las fuentes de emisión y determinar sus coordenadas hizo revisión del archivo ‘coordenadas chimeneas’ proporcionado por la empresa, donde se detallan las coordenadas UTM y geográficas de todas las chimeneas de Refinería Aconcagua, con sus respectivos códigos internos. Luego se corroboró que la ubicación fuera correcta y se aplicaron correcciones en los casos necesarios. A continuación, en la tabla 2 se muestra el detalle de las fuentes con sus coordenadas y en la figura 19 se muestra la distribución de las fuentes en la refinería.

Tabla 2 Listado y coordenadas de fuentes de emisión de dióxido de azufre

Fuente	Chimenea	Coord. Norte [msn]	Coord. Este [msn]	Tipo de fuente
B-130	B-130	6354012	265916	Horno
B-51				
B-52	B-52	6354015	265899	Horno
B-651	VTI	6353931	265824	Horno
B-652				
B-301	B-302	6353919	265870	Horno
B-302				
B-371	B-371	6353918	265888	Horno
B-372				
B-471	B-472	6353821	265881	Horno
B-472				
B-1201	B-1202	6353758	265739	Horno
B-1202				
B-1701	B-1701	6353746	265768	Horno
B-1801A	B-1801A	6353725	265814	Horno

Fuente	Chimenea	Coord. Norte [msn]	Coord. Este [msn]	Tipo de fuente
B-1801B	B-1801B	6353728	265806	Horno
B-751	B-751	6353982	265721	Horno
B-3001	B-3001	6353929	266263	Horno
SAR	SAR	6353739	265995	Planta de ácido sulfúrico
B-210	B-210	6354003	265785	Caldera
B-220	B-220	6354007	265777	Caldera
B-230	B-230	6354011	265750	Caldera
B-240	B-240	6354033	265731	Caldera
U-751	U-751	6353964	265770	Caldera
B-801	B-801	6353981	265706	Horno
B-755	B-755	6353984	265756	Cracking catalítico
B-190	B-190	6354011	266020	Horno
URA 1 (L-1101)	L-1101	6353838	265651	Planta de azufre
URA 2 (L-1644)	L-1644	6353828	265687	Planta de azufre
URA 3 (L-3504)	L-3504	6353929	266263	Planta de azufre
HRSB	HRSB	6354017	266886	Cogeneradora
A-100	A-100	6353547	265584	Antorcha
A-200	A-200	6353675	265635	Antorcha
Coker (L-3741)	L-3741	6353448	266633	Antorcha

Fuente: Elaboración propia



Figura 18: Mapa de fuentes de SO_2

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

4.2 Características de las fuentes de emisión

Para determinar las dimensiones de las fuentes de emisión se hizo revisión del documento maestro proporcionada por la empresa y los planos de los equipos presentes en la refinería, con el fin de corroborar, actualizar y/o corregir las alturas y diámetros de salida de las chimeneas de todas las fuentes de emisión. Además, se hizo una revisión y/o corrección de los tags de flujo de fuel gas de cada fuente, verificando la existencia de datos y que estos se encuentren sincronizados entre 'PI System' y Airviro.

4.2.1 Antorchas

La expresión utilizada para calcular las emisiones de dióxido de azufre en las antorchas es la siguiente:

$$Emisión_{SO_2} = Flujo_{Fuel\ Gas} \cdot Concentración_{H_2S} \cdot Densidad_{H_2S} \cdot \frac{PM_{SO_2}}{PM_{H_2S}}$$

En la tabla 3 se detallan las dimensiones de las antorchas, los tags de flujo de fuel gas, la velocidad de salida de los gases y la temperatura de la llama.

Tabla 3 Datos EDB Antorchas

Fuente	Tag de flujo [m³/h]	Diámetro de salida [m]	Altura [m]	Velocidad de salida [m/s]	Temperatura de salida [°C]
A-100	FI_890A.PV	0,55	30	60	1300
A-200	FI_891A.PV	0,74	25	65	1300
L-3741 (Coker)	FI_3700B.PV	0,76	42	66	1300

Fuente: Elaboración propia

Para la obtención del diámetro de salida de los gases y la altura se hizo una revisión de los planos de las fuentes proporcionados por el departamento de ingeniería de proyectos ERA. Por otro lado, para estimar la temperatura de la llama se utilizó un gráfico de temperatura según color de llama, el cual se extrajo de ‘Adiabatic Flame Temperature’, Engineering Toolbox, 2008 y se comparó con los datos proporcionados por el cromatógrafo de la empresa hasta obtener un valor representativo. Además, para obtener la velocidad de salida se supuso una densidad constante, combustión completa y un flujo es laminar, no viscoso, incompresible e irrotacional. Bajo estos supuestos se usó la ecuación de continuidad simplificada, quedando la siguiente expresión:

$$Vel_{salida} = Vel_{p.de\ muestreo} \cdot \left(\frac{diámetro_{p.de\ muestreo}}{diámetro_{salida}} \right)^2$$

Por último, se consideró que la concentración de H₂S de la mezcla que ingresa a las antorchas es igual a la del Fuel Gas y se usó el siguiente tag ‘H2S_F620_PPM.B’.

4.2.2 Hornos

La expresión utilizada para calcular las emisiones de SO₂ de los hornos es la siguiente:

$$Emisión_{SO_2} = Flujo_{Fuel\ Gas} \cdot \frac{Concentración_{H_2S} \cdot PM_{Fuel\ Gas}}{PM_{H_2S}} \cdot Densidad_{H_2S} \cdot \frac{PM_{SO_2}}{PM_{H_2S}}$$

En la tabla 4 se detallan las dimensiones de los hornos, los tags de flujo de fuel gas, la temperatura de llama y la velocidad de salida de los gases.

Tabla 4 Datos EDB Hornos

Fuente	Tag de flujo [m³/h]	Diámetro de salida [m]	Altura [m]	Velocida d de salida [m/s]	Temperatura de salida [°C]
B-130	fc_1681_comp.cv	2,47	52	7	229
B-51	fc_1593_comp.cv				
B-52	f1579b_comp.cv	1,12	40	8	250
B-651	fc_6621_comp.cv	1,9	43	5	163
B-652	fc_6609_comp.cv				
B-301	fc_3658_comp.cv	1,4	47	4	129
B-302	fc_3659_comp.cv				
B-371_1	fc_3919_comp.cv	2,6	53	4	200
B-371_2	fc_3918_comp.cv				
B-371_3	fc_3920_comp.cv				
B-371_4	fc_3921_comp.cv				
B-372	fc_3922_comp.cv				
B-471	fc_4837_comp.cv	1,3	42	4	261
B-472	fc_4838_comp.cv				
B-1201	fc_12049_comp.c v	2,8	51	3	220
B-1202	fc_12050_comp.c v				
B-1701	fi_17314_comp.cv	0,9	50	5	310
B-1801A	Fi_18014_comp.c v	1,1	64	6	310
B1801B	Fc_18914_comp.c v	1,1	64	5	291
B-751	Fi_746_comp.cv	1,6	39	9	320
B-3001	Fi_30137_comp.c v	2	65	8	176
B-801- FG1	Fc_822_comp.cv				
B-801- FG2	Fc_823_comp.cv				

Fuente	Tag de flujo [m ³ /h]	Diámetro de salida [m]	Altura [m]	Velocidad de salida [m/s]	Temperatura de salida [°C]
B-801-FG3	Fc_824_comp.cv	2,2	32	4	301
B-801-FG4	Fc_821_comp.cv				
B-190	FI190_1. pv	0,46	20	2	399

Fuente: Elaboración propia

Las temperaturas y velocidades de los hornos fueron extraídas al realizar un análisis de los tags indicados en el documento maestro, para lo que se buscó los valores más representativos. Además, se consideró que la concentración de H₂S será constante en la mezcla que ingresa, por lo que se utilizó el siguiente tag ‘H2S_F620_PPM.B’ para todos los hornos. Además, se usó el tag ‘AI_620C.PV’, para el peso molecular del fuel gas.

4.2.3 Calderas

Para calcular las emisiones de SO₂ de las calderas se utilizó la información proporcionada por el Sistema de Monitoreo continuo de Emisiones que se encuentra instalado en terreno, el cuál es conocido por sus siglas en inglés como ‘CEMS’. Además, este sistema permite obtener datos de salida para la velocidad y temperatura, sin embargo, se incorporan valores constantes estimados a partir de la información proporcionada por los tags vinculados a los sensores instalados en terreno y solo son utilizados en caso de que el ‘CEMS’ presente alguna falla o se encuentre en calibración y/o mantención. Cabe mencionar que este sistema de monitoreo permite validar y asegurar la calidad de los datos medidos. En la tabla 5 se detallan los datos utilizados para el modelo.

Tabla 5 Datos EDB Calderas

Fuente	Tag	Diámetro [m]	Altura [m]	Velocidad de salida [m/s]	Temperatura de salida [°C]
B-210	CEMS	2,5	39	4	315
B-220	CEMS	1,47	46	8	174
B-230	CEMS	2,46	51	4	101
B-240	CEMS	1,97	50	7	167

U-751	CEMS	2,74	43	7	259
--------------	-------------	-------------	-----------	----------	------------

Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Plantas de azufre

Para calcular las emisiones de SO₂ de las Unidades Recuperadoras de Azufre (URAs) se utilizó la información proporcionada por los ‘CEMS’. El que también nos permite obtener información de la temperatura y velocidad de salida, por lo que los valores mencionados en la tabla 6 solo son utilizados en caso de que el ‘CEMS’ presente alguna falla o esté en mantención.

Tabla 6 Datos EDB de plantas de azufre

Fuente	Tag	Diámetro [m]	Altura [m]	Velocidad de salida [m/s]	Temperatura de salida [°C]
L-1101 (URA 1)	CEMS	0,9	46	16	647
L-1644 (URA 2)	CEMS	0,6	45	12	323
L-3504 (URA 3)	CEMS	0,6	48	28,5	330

Fuente: Elaboración propia

4.2.5 Cracking catalítico

Para el cracking catalítico B-755 (FCCU) se utilizó un ‘CEMS’ para determinar las emisiones de SO₂. Además, se consideró una altura de 46 [m], diámetro de salida de 1,138 [m], temperatura de 347 [°C] y una velocidad de salida de los gases de 75 [m/s]. Estos últimos 2 valores son utilizados solo si el ‘CEMS’ presenta alguna falla o se encuentre en mantención.

4.2.6 Planta de ácido sulfúrico

Para la planta de ácido sulfúrico se utilizó la siguiente expresión para calcular las toneladas de dióxido de azufre por día.

$$E_{SO_2} \left[\frac{\text{Ton}}{\text{Día}} \right] = \frac{64}{98} \cdot \frac{\text{Prod}_{H_2SO_4}}{\text{Eficiencia}} \cdot (100 - \text{Eficiencia})$$

Para la producción de ácido sulfúrico se usó el tag ‘FI_19573.PV’ y se usó una eficiencia del 99,7%.

4.2.7 Cogeneradora

Para la cogeneradora ‘HRSG-Turbina’ se estimó un valor constante de 0,005 [ton/día].

5. Dominio del estudio

El dominio de este estudio se encuentra entre el punto 1 ($32^{\circ}55'17,73''$ S – $71^{\circ}33'0,4''$ O), 2 ($32^{\circ}56'46,71''$ S – $71^{\circ}32'57,47''$ O), 3 ($32^{\circ}55'21,96''$ S – $71^{\circ}28'24,13''$ O) y 4 ($32^{\circ}56'52,35''$ S – $71^{\circ}28'16,4''$ O). Estos se observan en la figura 21, mientras que en la figura 20 se observa que el tamaño de celda de grilla que se utilizará será de 100 metros.

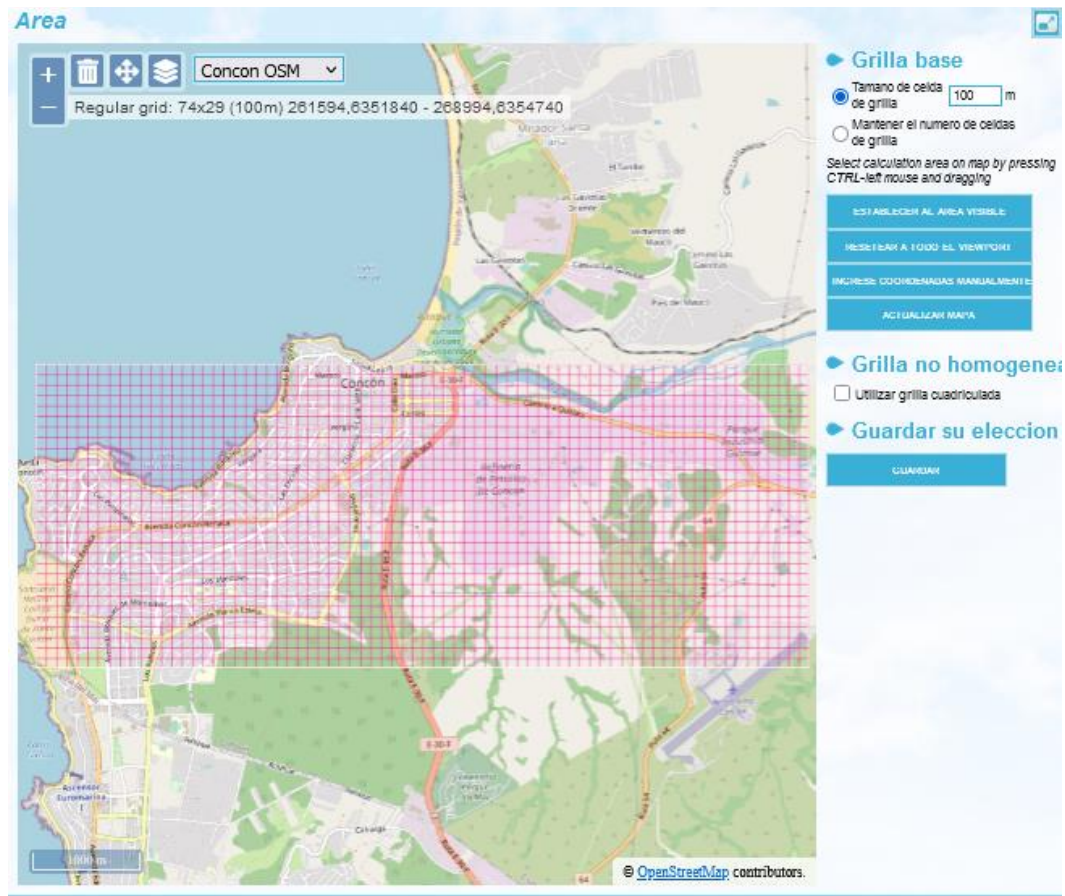


Figura 19 Dominio de modelación y grilla

Fuente: Airviro

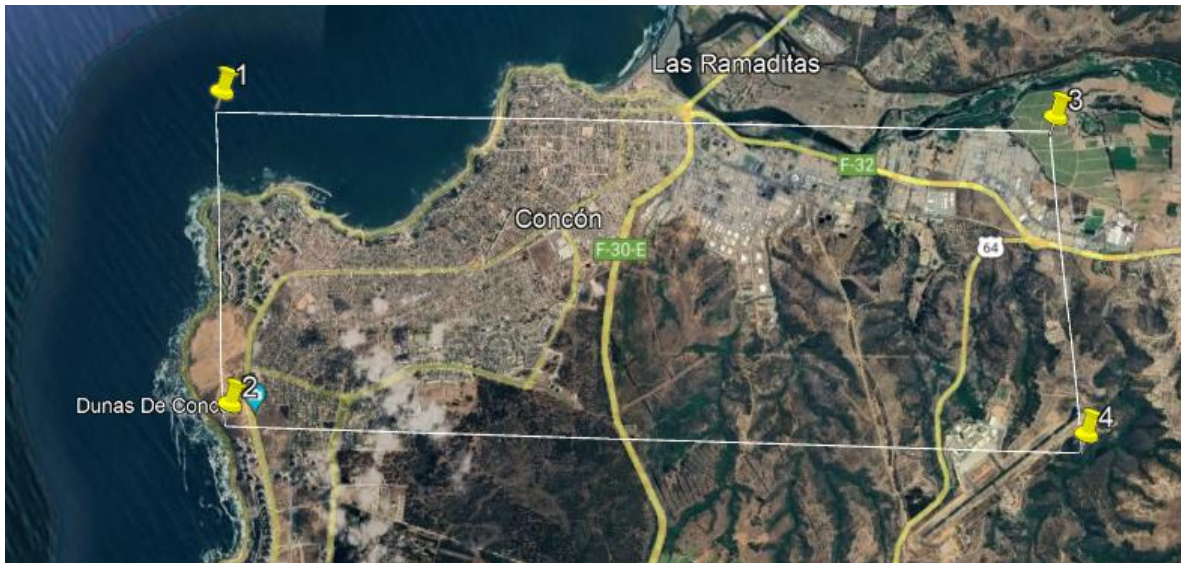


Figura 20 Dominio de modelación y extremos

Fuente: Google Maps

6. Base de datos de emisiones (EDB)

Una vez se recopiló toda la información requerida para crear una EDB, se fue creando fuente por fuente como se puede observar en la figura 22, donde se ingresa el nombre de la fuente, las coordenadas, en configuración de chimenea de ingresan las dimensiones y los datos de respaldo para la temperatura y velocidad de salida como se observa en la figura 23 y en sustancia que conecta la fuente de emisión con su macro o serie de tiempo (figura 24). Además, cabe mencionar que en la sección clave de búsqueda que se observa en la figura 25 se clasificaron las fuentes de emisiones según su tipo de fuente, con el fin de realizar simulaciones según su tipo.

► **Informacion Nombre**

Nombre

Info

Info2

Instalaciones

► **Coordenadas**

Coord. X1 Coord. X2 Ultimo cambio

Coord. Y1 Coord. Y2 Fecha

► **Chimenea**

► **Emissions**

► **Claves de busqueda**

1 2

3 4

5

► **Otros**

► **Guardar su eleccion**

Figura 21 Pantallazo modulo EDB al incorporar una fuente

Fuente: Airviro

► **Estatico**

ChimeneaHeight [m]

Diametro externo chimenea [m]

Diametro interno chimenea [m]

Temperatura salida gas [C]

Velocidad salida gas

Ancho casas [m]

Altura casas [m]

► **Apply your choices**

Figura 22 Pantallazo modulo EDB, configuración de chimenea

Fuente: Airviro

Substancias

NO	AGREGAR A EMISIONES
NO2	
NO3	
NOX	
NOY	
o-xylene	
O3	
p-xylene	
pentene	
phenol	
propane	
SO2	
styrene	
tolueno	

Emisiones

			COPIAR PRIMERO	COPIAR PRIMERO	COPIAR PRIMERO	
Substancias	emision	unidad	time var.	agregar info	codigos	serie tiempo
SO2	0.0000	ton/year	STANDARD	INFO. ADICIONAL	CODIGO ACT.	SERIE TIEMPO
						jtobar/F22_EMI
						[g/s]

Figura 23 Pantallazo modulo EDB, agregar serie de tiempo o macro

Fuente: Airviro

Claves de búsqueda

Clave de búsqueda1

Clave de búsqueda2

Clave de búsqueda3

Clave de búsqueda4

Clave de búsqueda5

AGREGAR

BORRAR

Definición

1 F1_B130+B51

2 F2_B52

3 F3_B651+B652

4 F4_B301+B302

5 F5_B371+B372

6 F6_B471+B472

7 F7_B1201+B1202

8 F8_B1701

9 F9_B1801A

10 F10_B1801B

11 F27_B751

12 F12_B3001

13 F28_B801

14 F13_B190

15

16

17

18

19

20

21

22

23

65

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

Guardar su elección

GUARDAR

Figura 24 Pantallazo creación EDB, clave de búsqueda

Fuente: Airviro

Una vez se incorporaron todas las fuentes de emisión a la base de datos para realizar simulaciones en el módulo ‘dispersion’ está lista. Lo cual se visualiza en la figura 26 y se clasifican según su categoría como se detalla en la figura 27.

Puntos

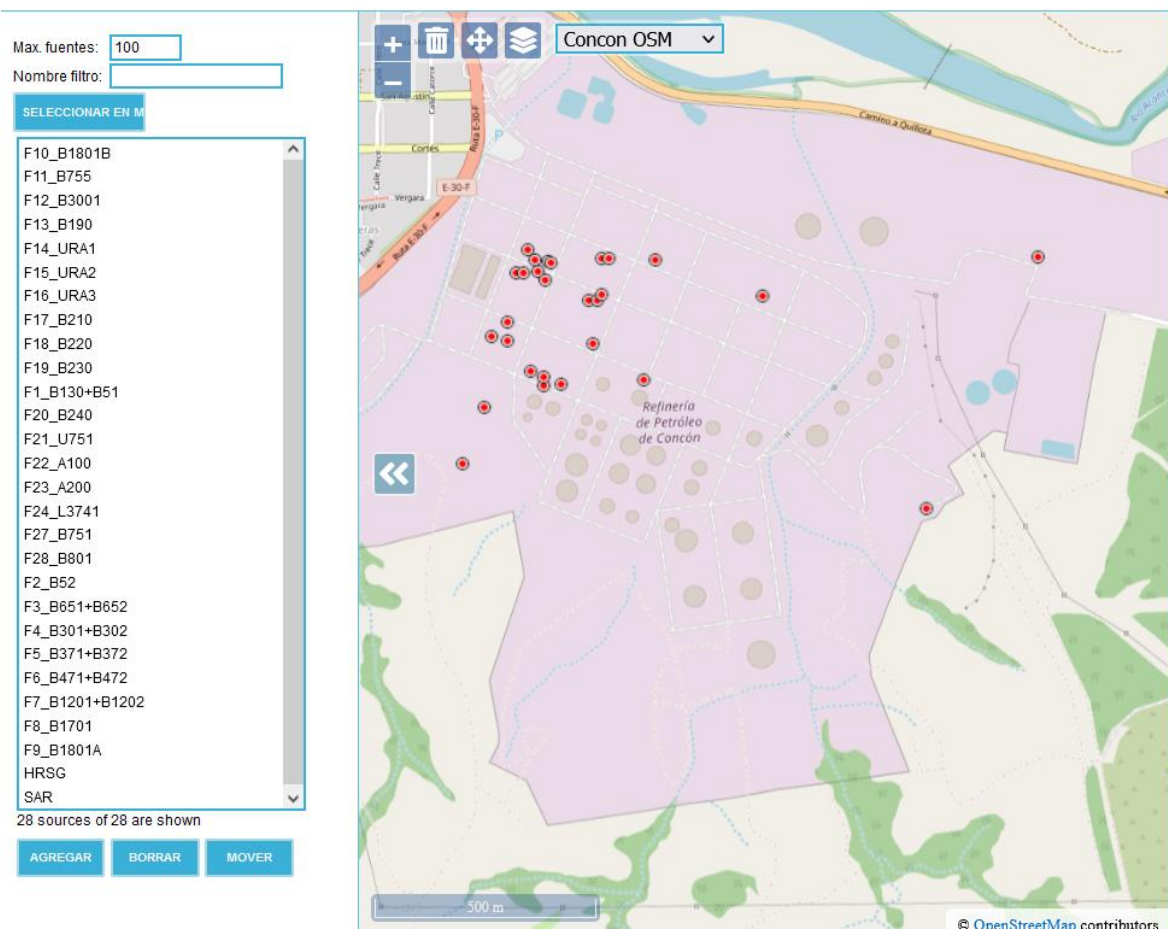


Figura 25 Pantallazo módulo dispersion con todas las fuentes de emisión

Fuente: Airviro



Figura 26 Clasificación de fuente de emisiones

Fuente: Elaboración propia

7. Elección de modelo de dispersión

Se determino comparar 3 tipos de modelos de dispersión de contaminantes (Gauss, Aermid y Calpuff), con el propósito de determinar el modelo que se ajusta mejor a las condiciones de ENAP Refinería Aconcagua. Por lo que a continuación se detallaran las características de cada modelo.

7.1 Modelo de dispersión de Gauss

El modelo de dispersión de Gauss calcula los niveles de inmisión en un punto del espacio de coordenadas (x, y, z), donde el origen del sistema de coordenadas se fija en base al nivel del suelo sobre áreas urbanas o industriales, con una escala típica de una o unas décimas de kilómetros. El límite inferior del tamaño del área de aplicación está limitado por los coeficientes del modelo gaussiano, siendo poco eficiente o no valida cuando está cerca de la fuente (distancias menores a 25 metros). El límite superior está dado por la prevalencia de condiciones estacionarias durante el tiempo en que tarda la partícula en dispersarse por el área. Este simula valores medios de una hora, en donde supone que las características del viento son constantes, lo cual debe tenerse presente al momento de realizar simulaciones para escalas mayores a 20 kilómetros.

La ecuación general utilizada para calcular la concentración de un contaminante en un punto espacial es la siguiente:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-h}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+h}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\}$$

Donde x, y, z son las coordenadas espaciales en metros, C(x, y, z) es la concentración de contaminante en un punto en g/m³, Q es el caudal en g/s, σ_z , σ_y son las desviaciones estándar en las direcciones “y” y “z” respectivamente en metros, μ es la velocidad media del viento en el sentido del eje x en m/s y h es la altura efectiva de emisión en metros.

Los valores de la desviación estándar o también conocidos como coeficientes de dispersión se calculan por medio de las siguientes ecuaciones.

$$\sigma_y = ax^{0.894}$$

$$\sigma_z = cx^d + f$$

Donde x está en kilómetros, y las constantes a , c , d y f están tabuladas según cada caso, teniendo un resultado en metros. Cabe mencionar que este modelo no considera la acumulación de contaminantes al momento de simular.

7.2 Modelo de dispersión de Aermod

El modelo de dispersión de Aermod es un modelo de pluma Gaussiano en estado estacionario, utilizado para simular la dispersión de contaminantes en el aire y su deposición. (“Modelos Ambientales S.A. de C.V. AERMOD View”) Para esto considera las características del terreno y presencia de edificios cercanos a la fuente de emisión, los cuales pueden generar cambios en la dispersión de la pluma. Además, este utiliza información del clima de la capa superior atmosférica y realiza las siguientes suposiciones:

- Emisiones continuas de partículas y gases
- Las fuentes de emisión y condiciones meteorológicas son constantes
- No existen reacciones químicas
- Condiciones estacionarias
- Transporte constante en dirección horizontal
- Se ignoran los cambios de la velocidad del viento con la altura
- El viento es uniforme en todo el dominio

En la tabla 7 se indican las ventajas y desventajas de la aplicación de este modelo.

Tabla 7 Ventajas y desventajas del modelo de dispersión de Aermod

Ventajas	Desventajas
Simple de usar	Sólo simulan trayectorias rectilíneas
Utiliza información meteorológica	Campos de vientos homogéneos
Simula impacto en condiciones extremas	Dificultad para modelar a velocidades muy bajas
Aplicable para fuentes puntuales, lineales y de área	No considera las reacciones químicas de los contaminantes

Fuente: Elaboración propia

Es importante mencionar que el modelo de dispersión Aermod cuenta con 2 preprocesadores, los cuales son:

Aermet: Es un procesador meteorológico que simula procesos en la capa límite y calcula otros parámetros para el correcto funcionamiento de Aermod.

Aermap: Es un preprocesador de topografía que utiliza los datos del terreno para calcular una altura de influencia representativa del terreno.

7.3 Modelo de dispersión Calpuff

El modelo de dispersión Calpuff, es un sistema avanzado de modelado meteorológico y de calidad del aire en estado no estacionario. Este ha sido catalogado por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA) como un modelo alternativo para evaluar el transporte de largo alcance de contaminantes y sus impactos. Este consta principalmente de 3 componentes y un conjunto de programas de pre y post procesamiento, los cuales se detallan a continuación:

- **Calmet:** Modelo meteorológico tridimensional de diagnóstico que también puede aceptar los campos de vientos preprocesados.
- **Calpuff:** Modelo de dispersión de calidad del aire. Este brinda una completa variación espacial de viento y estabilidad, hora tras hora y es aplicable para distancias inferiores a los 300 kilómetros.
- **Calpost:** Paquete de post procesamiento

Además, este sistema de modelado permite usar múltiples procesadores para preparar datos geofísicos, meteorológicos e interfaces a otros modelos.

Este modelo fue planteado para dar solución a las principales desventajas de los modelos de pluma gaussiana. Teniendo que cada fuente involucrada genera su propio ‘puff’, que sigue la trayectoria del viento independiente de las demás fuentes. Con esto se genera una trayectoria no lineal mucho más precisa que la obtenida por modelos de pluma gaussiana.

Las principales aplicaciones y ventajas que tiene este modelo son las siguientes:

- Permite tratar en el tiempo fuentes puntuales y de área en dominios de modelado que decenas de metros hasta cientos de kilómetros con estimaciones que van desde una hora a un año promedio.
- Considera las fluctuaciones y elevaciones del terreno (terrenos complejos) sobre los procesos de dispersión y remoción de contaminantes.

- Apto para utilizarse en condiciones de viento débil, estancamiento, inversión térmica, recirculación y fumigación.
- Idóneo para zonas con transporte de agua y/o zonas costeras.
- Modelado la formación de contaminantes secundarios y material particulado.
- Modelado de fuentes lineales y de área flotante

Cabe mencionar que este modelo se ha utilizado ampliamente para determinar el impacto de fuente puntuales y lineales en complejos industriales y con ello cuantificar los efectos de la contaminación atmosférica en la salud, siendo útil en la aplicación de políticas para mitigar y/o enfrentar futuros escenarios producto del cambio climático.

La expresión utilizada por los receptores para determinar la concentración de las emisiones es la siguiente:

$$C_R = \frac{Q F_y(t_R) F_z(t_R)}{(t_2 - t_1) 4\pi\mu\sigma_z z e \sigma_y y e} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{t_2 - t_R}{\sqrt{2}\sigma_y \frac{y e}{\mu}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{t_1 - t_R}{\sqrt{2}\sigma_y \frac{y e}{\mu}} \right] \right\}$$

Donde para el periodo t_1 a t_2 , donde Q es la masa total del material en la salida de la chimenea, $F_z(t_R)$ y $F_y(t_R)$ son las funciones de las distribuciones vertical y horizontal de la pluma en función del tiempo de viaje desde la fuente hasta el receptor, μ es la velocidad media (m/s) de la elevación del centro de la pluma, ' $\sigma_z z e$ ' y ' $\sigma_y y e$ ' son los parámetros de dispersión efectiva (m).

7.4 Comparación entre modelos

Para determinar el modelo que se adapte de mejor forma a las condiciones de ENAP Refinería Aconcagua, se realizó una modelación horaria para cada modelo y se comparó cada una con 3 estaciones de la figura 27 (Concón, Junta de vecinos y UMA). Estas simulaciones se realizaron para 2 periodos de tiempo distintos (Invierno y Verano) con el fin de estudiar el comportamiento de cada modelo para estaciones distintas.

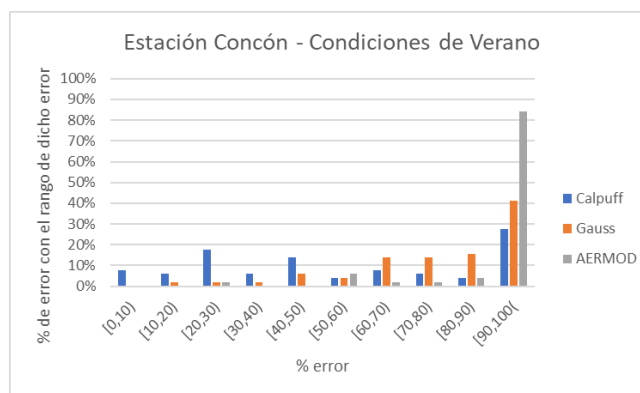


Figura 27 Mapa estaciones de calidad del aire

Fuente: Airviro

El procedimiento utilizado para comparar los datos de las estaciones con los simulados fue verificar cuando la dirección de la pluma apuntaba hacia la estación correspondiente, con el fin de obtener datos representativos para la estación. Además, se verificó que la velocidad del viento estuviera dentro de un rango de 0,5 – 2 metros para asegurar la calidad del dato comparado, debido a que cuando los valores están fuera de este rango se ve afectada la calidad de las mediciones al verse limitados por su resolución.

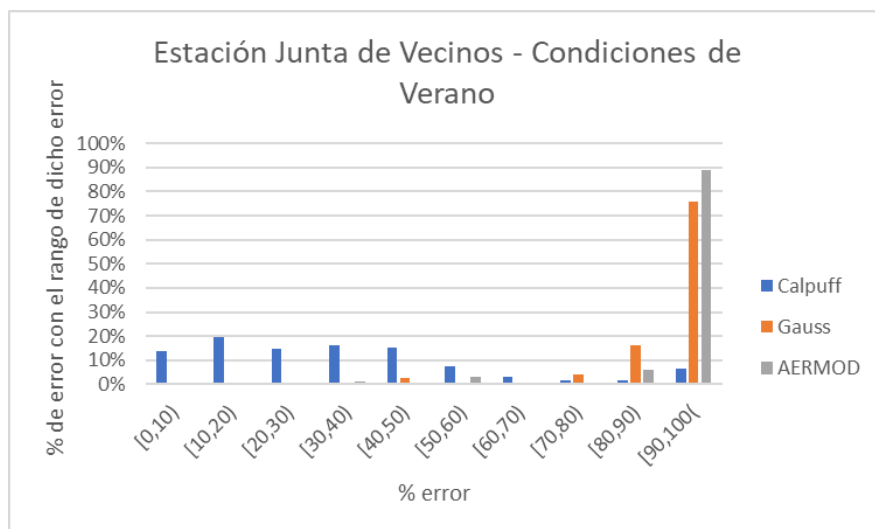
1. Condiciones de verano: 21 de diciembre de 2021 – 21 de mayo de 2022
 - a. Estación Concón



Gráfica 2 Gráfica de frecuencia - Estación Concón - Condiciones de Verano

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de Airviro

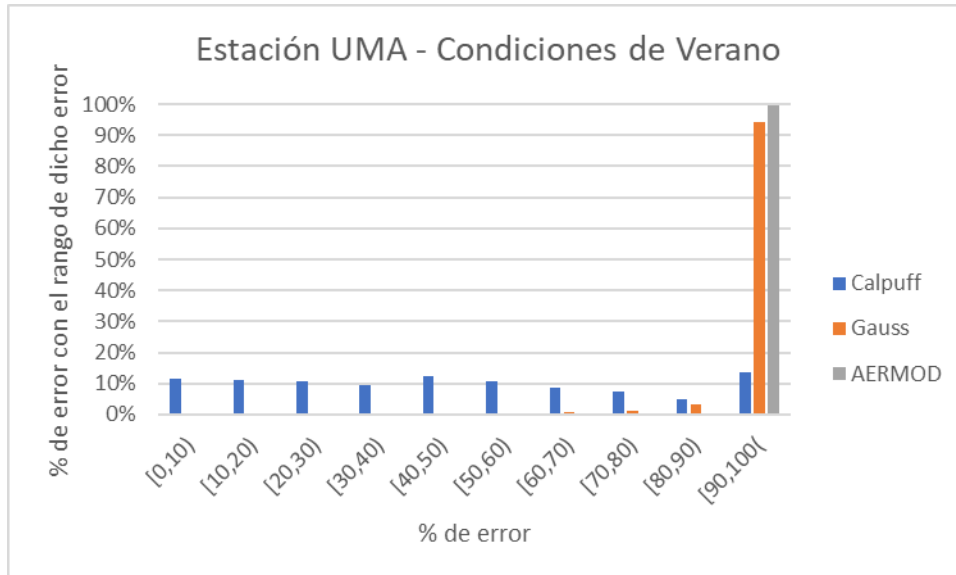
b. Estación Junta de Vecinos



Gráfica 3 Gráfica de frecuencias - Estación Junta de Vecinos - Condiciones de Verano

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Airviro

c. Estación UMA

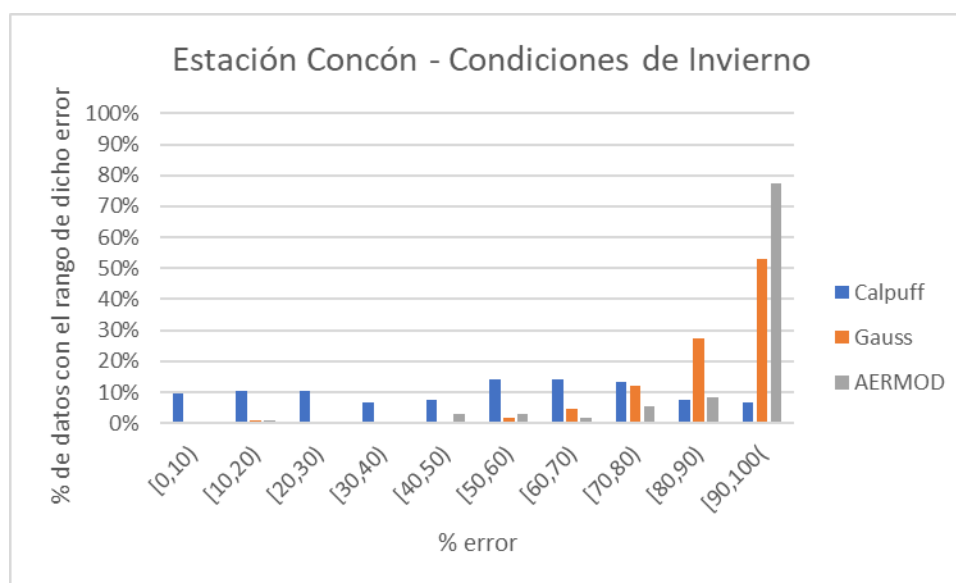


Gráfica 4 Gráfica de frecuencias - Estación UMA - Condiciones de Verano

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Airviro

2. Condiciones de invierno: 21 de Junio 2021 – 23 de septiembre 2021

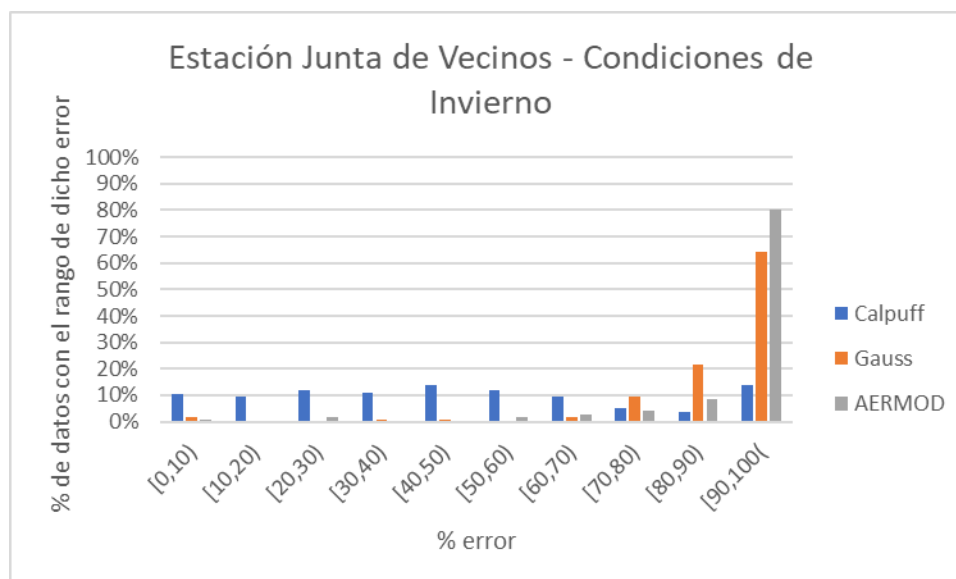
a. Estación Concón



Gráfica 5 Gráfico de frecuencias - Estación Concón - Condiciones de invierno

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de Airviro

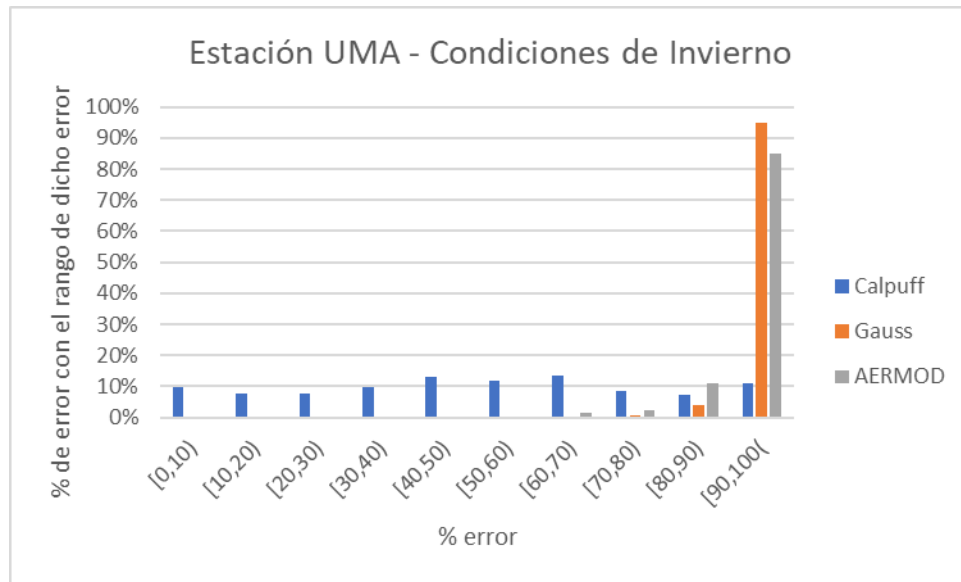
b. Estación Junta de vecinos



Gráfica 6 Gráfico de frecuencias - Estación Junta de Vecinos - Condiciones de Invierno

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de Airviro

c. Estación UMA



Gráfica 7 Gráfica de frecuencias - Estación UMA - Condiciones de Invierno

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de Airviro

7.5 Resultados de comparación de modelos de dispersión

De acuerdo con los resultados visibles en las gráficas 2 a la 7 se concluye que el modelo de dispersión que mejor se adapta a las condiciones de ENAP Refinería Aconcagua es ‘Calpuff’, debido a que este arroja errores mucho menores en comparación con los otros modelos. Además, se tiene que este posee un buen comportamiento para distancia inferiores a 300 km, considera las fluctuaciones de terreno, es idóneo para zonas costeras y es apto para condiciones de viento débil, estancamiento, inversión térmica, recirculación y/o fumigación. Por lo que las modelaciones realizadas en este trabajo serán del tipo ‘Calpuff’.

8. Estación meteorológica

8.1 Características de la estación meteorológica

La modelación de dispersión mediante Calpuff no podría llevarse a cabo sin la información proporcionada por la torre meteorológica. La cual nos permite determinar el gradiente de temperatura, presión, radiación, ruido, dirección y velocidad del viento. La ubicación de la torre es 32°55’33,44” S – 71°30’14,80”

O, con una elevación de 12 metros sobre el nivel del mar, lo cual se ve a continuación en la figura 28.

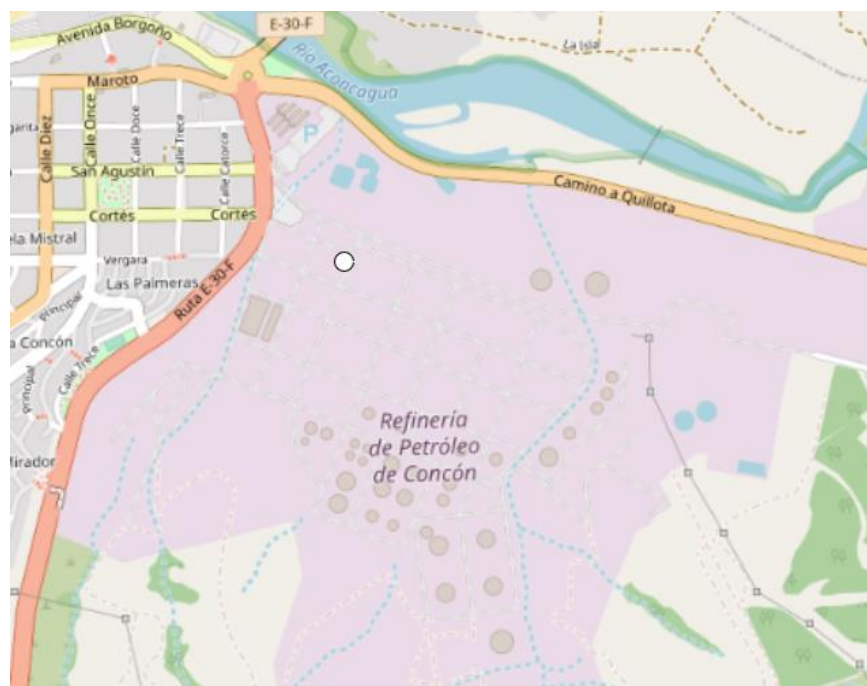


Figura 28 Ubicación estación meteorológica ENAP Refinería Aconcagua

Fuente: Airviro

Esta cuenta con sensores de temperatura a 2,8 y 22 metros de altura como se observan en la figura 29,30 y 31. A una altura de 12 metros se tiene un sensor de dirección y velocidad de tiempo que mide hasta un máximo de 2 m/s y a 30 metros se tiene un sensor ultrasónico que mide la velocidad y dirección del viento con mayor precisión.



Figura 29 Torre meteorológica ENAP Refinería Aconcagua

Fuente: Fotografía tomada en terreno



Figura 30 Sensor de temperatura a 2 metros de altura, estación meteorológica

Fuente: Fotografía tomada en terreno



Figura 31 Zona baja estación meteorológica

Fuente: Fotografía tomada en terreno

8.2 Estabilidad e inestabilidad atmosférica

Son condiciones meteorológicas que permiten determinar el comportamiento de los contaminantes y otros gases en la atmósfera. La estabilidad atmosférica es una condición de equilibrio que ocurre cuando una atmósfera estable recibe una perturbación en el flujo y vuelve a su estado original y una atmósfera es inestable cuando esta no vuelva a su estado original una vez es perturbada, es decir, a menor estabilidad atmosférica, existe mejor dispersión de los contaminantes en la atmósfera.

Para determinar el grado de estabilidad se utilizan principalmente la radiación solar y velocidad del viento, aunque existen métodos que usan la nubosidad y altura solar (ángulo de inclinación del sol con respecto a un punto en la tierra).

Esta se divide en 7 categorías:

- A. Fuerte inestabilidad
- B. Moderada inestabilidad
- C. Ligera inestabilidad
- D. Neutra inestabilidad
- E. Ligera estabilidad
- F. Fuerte estabilidad
- G. Inversión térmica

Se tiene que la inversión o inversión térmica ('G') se presenta generalmente en las mañanas, donde la temperatura de la superficie es menor que la temperatura de las alturas. En las ciudades sin industrias se tiende a dar la inversión térmica solo entre 6 o 7 a.m. de la mañana, donde la temperatura de la atmósfera se encuentra fría y se encienden las emisiones de la ciudad como vehículos y calefacción, lo que genera que las partículas queden atrapadas y sean dispersadas a medida que cambian las condiciones con el transcurso del día. Caso contrario son los demás casos, los cuales se dan cuando la temperatura de la superficie es mayor que la temperatura atmosférica y esta disminuye a mayor altura. Se tiene que de A-C la dispersión de las partículas ocurre de manera fácil y rápida, siendo el caso A donde existe una mayor distribución de las partículas. Sin embargo, en las ciudades con industrias se tienden a dar del caso D al F, donde existe una mancha oscura de forma constante. Mientras más cerca se esté de G se formará Smog o acumulación de contaminantes con mayor facilidad.

Se tiene que mientras más cerca de A habrá una mayor altura de mezcla, es decir, mayor será la altura de la capa máxima donde los contaminantes se mezclarán. Además, se tiene que sobre las capas habrá una velocidad del viento mayor conocida como Jet Stream, las cuales son corrientes de viento muy rápidas que permiten la dispersión de las partículas en la atmósfera, pero mientras exista una capa de mezcla los contaminantes estarán atrapados.

Existen 6 diferentes tipos de plumas según las condiciones de estabilidad, las cuales se muestra a continuación en la figura 32.

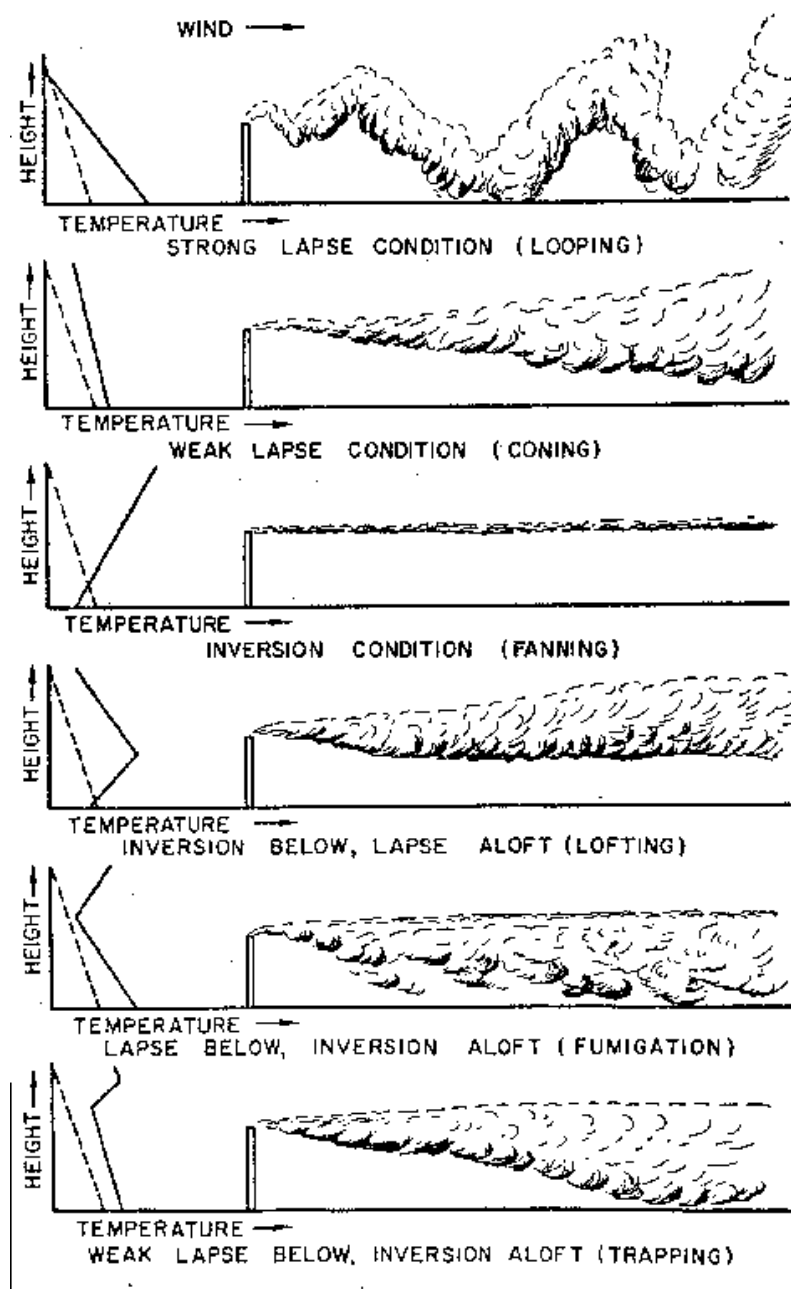


Figura 32 Tipos de plumas

Fuente: Deposition Ácida, Eugene S. Takle, 1998

La primera pluma se denomina ‘Serpenteante’, esta es muy inestable y se encuentra en las categorías A-C, teniendo para A una mayor altura y movimiento. La segunda se le conoce como tipo ‘Cónico’ y se tiende a para condiciones neutras como el tipo D. La tercera y cuarta se les conoce como tubular que es similar a las cónicas, pero más cerradas y se tiene una estabilidad que va entre el tipo E y F. La quinta es el anti-fumigante la cual ocurre cuando hay una inversión térmica antes de la altura de emisión y luego tiene un comportamiento normal pudiendo ser neutro, estable o inestable. Y la última es el fumigante que ocurre cuando hay inversión térmica y si la chimenea está cerca de la superficie puede generar problemas en los seres vivos, siendo peligrosa.

Con el fin de determinar la estabilidad atmosférica se utiliza el esquema de Pasquill-Gifford-Turner. Este método permite relacionar la velocidad del viento y radiación solar con la estabilidad atmosférica, de manera diferenciada para el día y la noche. A continuación, en la tabla 8 se muestran las condiciones para establecer el tipo de estabilidad.

Tabla 8 Correlaciones para estabilidad atmosférica de Pasquill-Gifford

Correlaciones para estabilidad atmosférica de Pasquill-Gifford					
Velocidad del viento [m/s]	Radiación solar intensa	Radiación solar moderada	Muy poca radiación solar	En la noche: Poca nubosidad	En la noche: Nubosidad <3/8
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-4	B	B-C	C	D	E
4-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Fuente: Woodward, 1998, p. 209 tabla A.1

A partir de la información de la estación meteorológica, como la velocidad y diferencial de temperatura se hace una estimación de la categoría de estabilidad y se aplica un factor de correlación a la altura de la pluma según cada caso, como se observa en la tabla 9.

Tabla 9 Categorías de estabilidad y sus factores de corrección correspondientes

Categorías de estabilidad (Clases)	Factor de corrección aplicado a la altura efectiva calculada
A, B	1,15
C	1,1
D	1
E, F	0,85

Fuente: Center of Chemical Process Satify, 1996, p. 16, tabla 3

9. Análisis de Fuel Gas

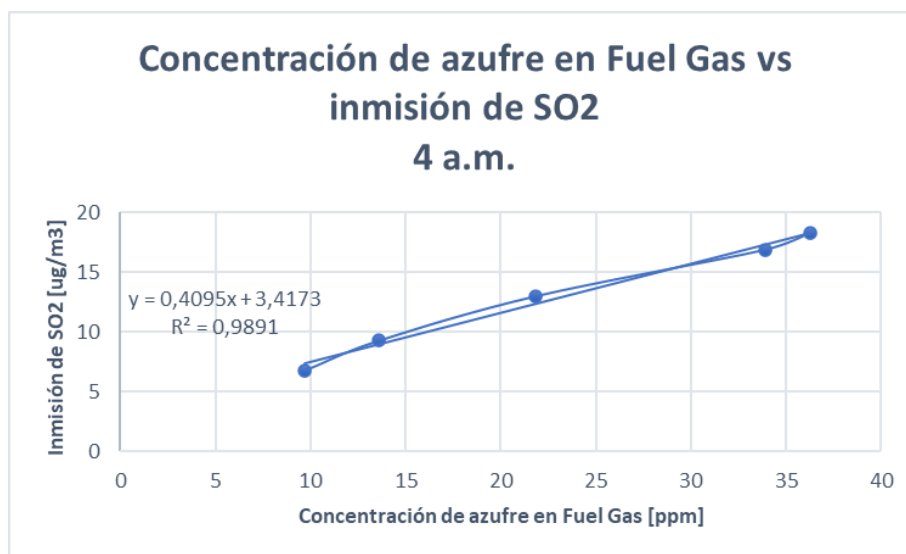
En este análisis se estudió como varían las emisiones de SO₂ a medida que cambia la concentración de azufre en el Fuel Gas (mezcla de gas de refinería y gas natural) utilizado como combustible en la mayor parte de las fuentes de emisión. Para esto se consideró que la mayor parte del azufre se encuentra en forma de ácido sulfhídrico (H₂S).

El procedimiento que se utilizó fue realizar distintas simulaciones de emisión de SO₂ para condiciones similares de temperatura, dirección y velocidad del viento y por medio del tag de H₂S presente en el fuel gas ('H2S_F620_PPM.B') se estudió como la variación en la concentración de azufre impactaban las inmisiones de SO₂, lo cual se detalla a continuación entre las gráficas 8 a la 12 y tabla 10 a la 14.

Tabla 10 Fechas de concentración de azufre en fuel gas e inmisiones de SO₂ [ug/m³] 4 a.m.

4 a.m.		
Fecha	Concentración de azufre en Fuel Gas [ppm]	Inmisión SO ₂ [µg/m ³]
16/05/2022	9,7	6,8
12/05/2022	13,6	9,3
28/04/2022	21,8	13
13/02/2022	33,9	16,9
22/03/2022	36,3	18,3

Fuente: Elaboración propia



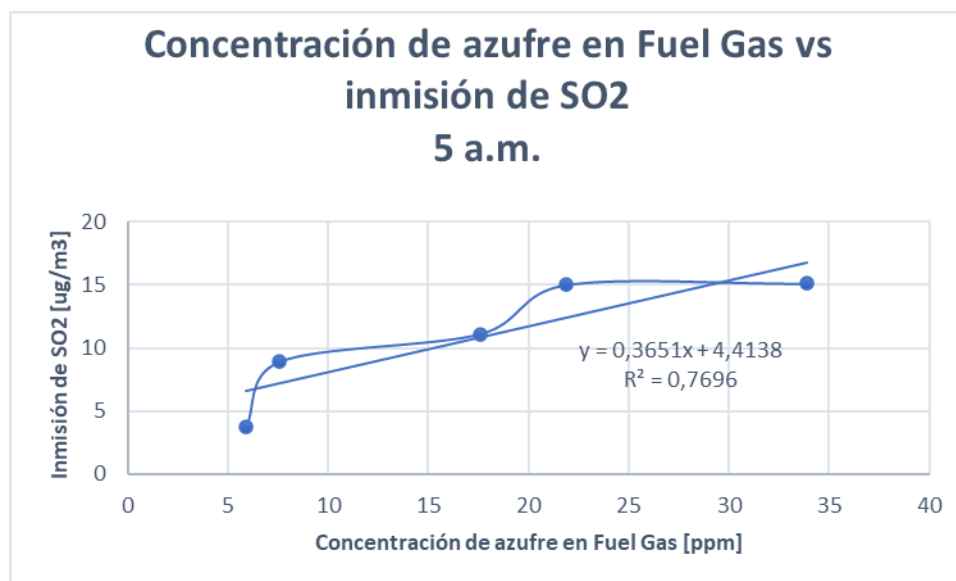
Gráfica 8 Concentración de azufre en Fuel Gas vs Inmisiones de SO₂ [ug/m³] a las 4 a.m.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11 Fechas de concentración de azufre en el fuel gas e inmisiones de SO₂ [ug/m³] 5 a.m.

5 a.m.		
Fecha	Concentración de azufre en Fuel Gas [ppm]	Inmisión SO ₂ [μg/m ³]
29/01/2022	5,9	3,7
03/05/2022	7,6	8,9
20/05/2022	17,6	11,1
15/05/2022	21,9	15
13/02/2022	33,9	15,1

Fuente: Elaboración propia



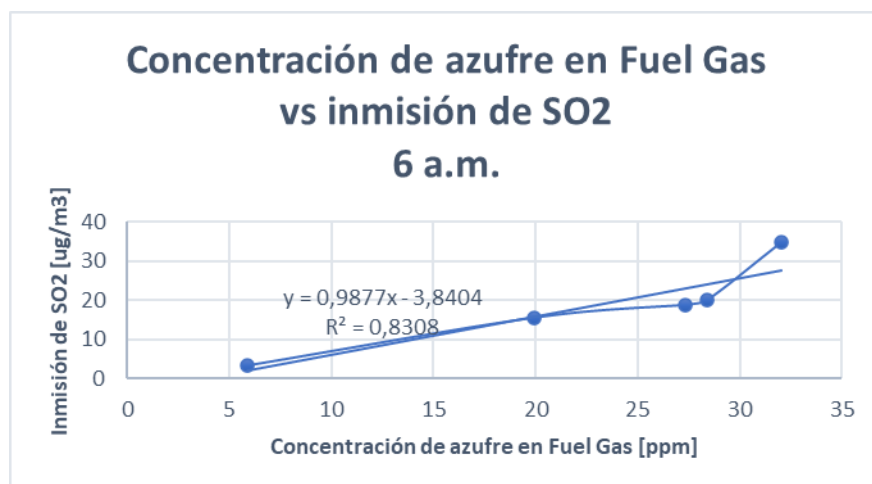
Gráfica 9 Concentración de azufre en Fuel Gas vs inmisiones de SO₂ [ug/m³] 5 a.m.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12 Fechas de concentración de azufre e inmisión de SO₂ [ug/m³] 6 a.m.

6 a.m.		
Fecha	Concentración de azufre en Fuel Gas [ppm]	Inmisión SO ₂ [μg/m ³]
29/01/2022	5,9	3,4
19/01/2022	19,9	15,6
21/03/2022	27,3	18,9
18/03/2022	28,4	20,2
22/02/2022	32	34,8

Fuente: Elaboración propia



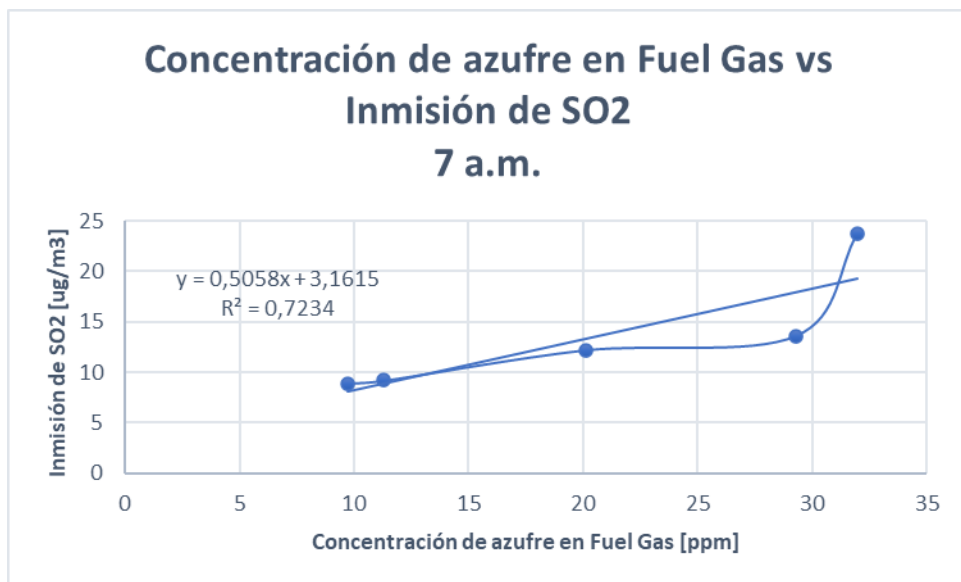
Gráfica 10 Concentración de azufre en fuel gas vs inmisión de SO₂ [ug/m³] 6 a.m.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13 Fechas de concentración de azufre en fuel gas e inmisión SO₂ [ug/m³] 7 a.m.

7 a.m.		
Fecha	Concentración de azufre en Fuel Gas [ppm]	Inmisión SO ₂ [μg/m ³]
16/05/2022	9,7	8,9
27/03/2022	11,3	9,2
02/05/2022	20,1	12,2
23/02/2022	29,3	13,6
13/02/2022	32	23,7

Fuente: Elaboración propia



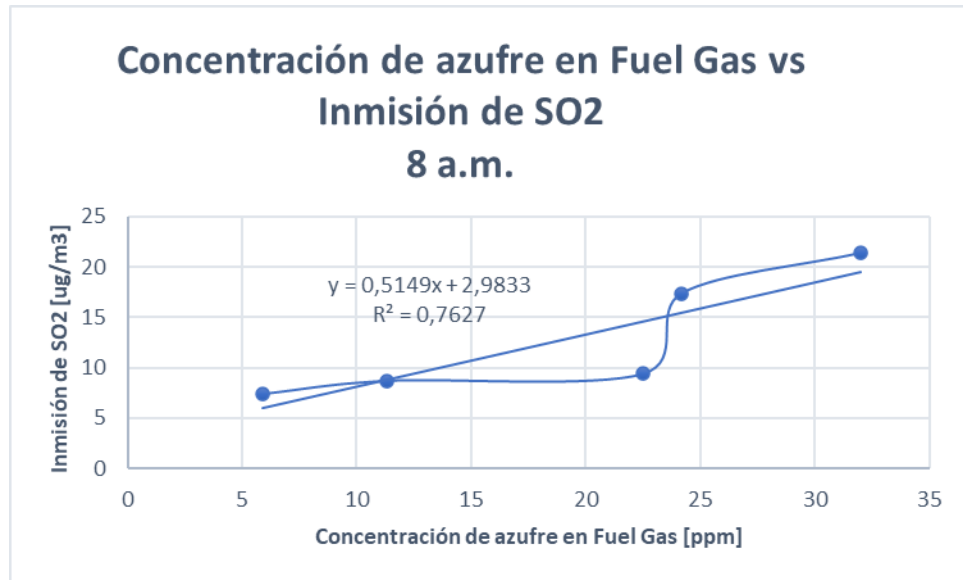
Gráfica 11 Concentración de azufre en Fuel Gas vs inmisión de SO₂ [ug/m³] 7 a.m.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14 Fecha de concentración de azufre en el fuel gas e inmisión [ug/m³] 8 a.m.

8 a.m.		
Fecha	Concentración de azufre en Fuel Gas [ppm]	Inmisión SO ₂ [μg/m ³]
29/01/2022	5,9	7,4
27/03/2022	11,3	8,7
18/01/2022	22,5	9,4
14/02/2022	24,2	17,4
22/02/2022	32	21,4

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 12 Concentración de azufre en fuel gas vs inmisión de SO₂ [ug/m³] 8 a.m.

Fuente: Elaboración propia

Tal como se observa existe una clara tendencia al aumentar las inmisiones de SO₂ a medida que aumenta la concentración de azufre en el fuel gas. Sin embargo, existen casos en donde al aumentar la concentración de azufre no aumenta la concentración de SO₂, lo cual puede ser producto de una combustión incompleta, mediciones erróneas en la torre meteorológica o la estación de monitoreo, problemas operacionales, condiciones de operación anómalas o errores del modelo.

10. Análisis de altura de modelación

En este análisis se estudió como cambian la concentración de SO_2 a distintas alturas para un mismo periodo de tiempo. Para lo cual se realizaron distintas modelaciones entre 30/03/2022 a las 1 a.m. y 30/03/2022 a las 2 a.m., debido a que durante este periodo de tiempo la velocidad del viento se encuentra dentro de un rango medio (0,5 – 2 m/s), ya que vientos fuertes pueden generar problemas en el resultado. A continuación, se presentan simulaciones para distintas alturas de las figuras 34 a la 37.

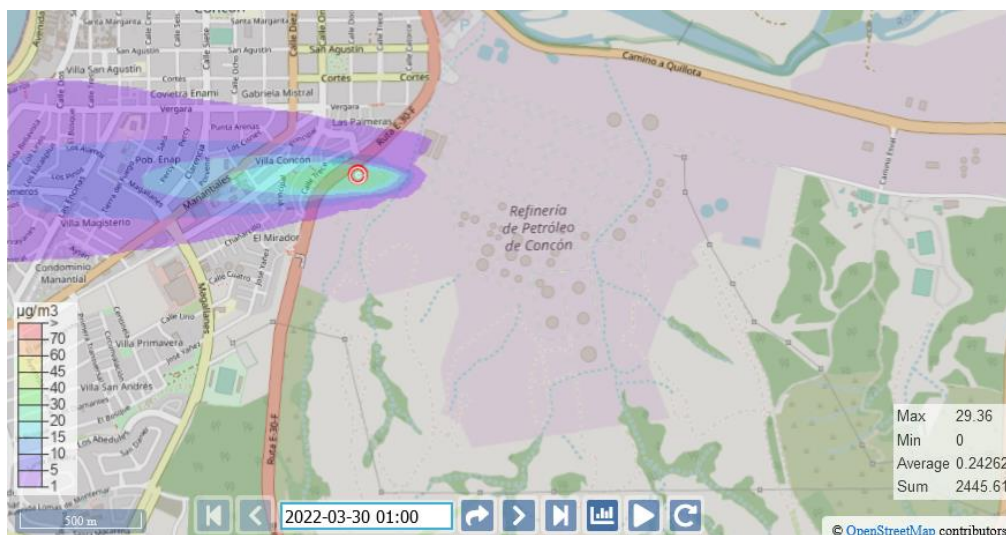


Figura 33 Simulación 2022-03-30 01:00, 2 metros de altura

Fuente: Elaboración propia

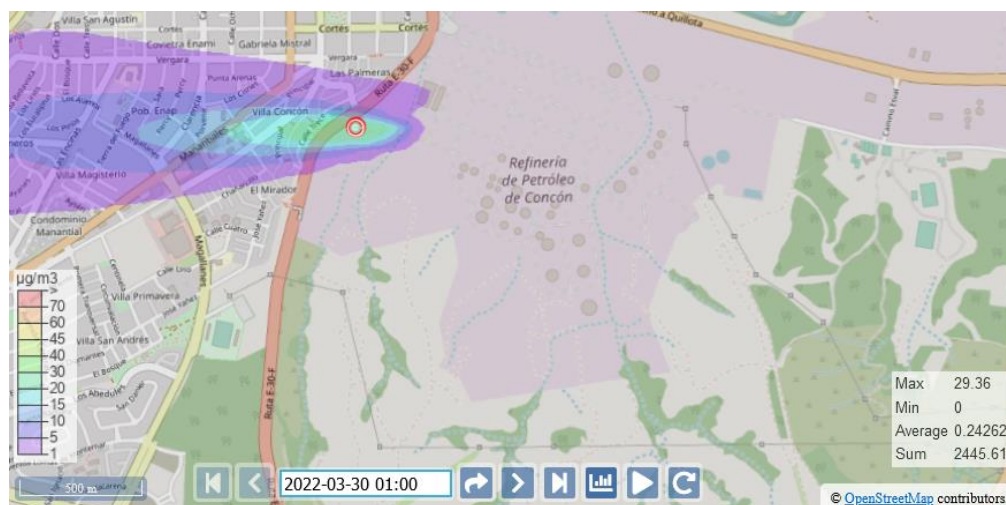


Figura 34 2022-03-30 01:00, 20 metros de altura

Fuente: Elaboración propia

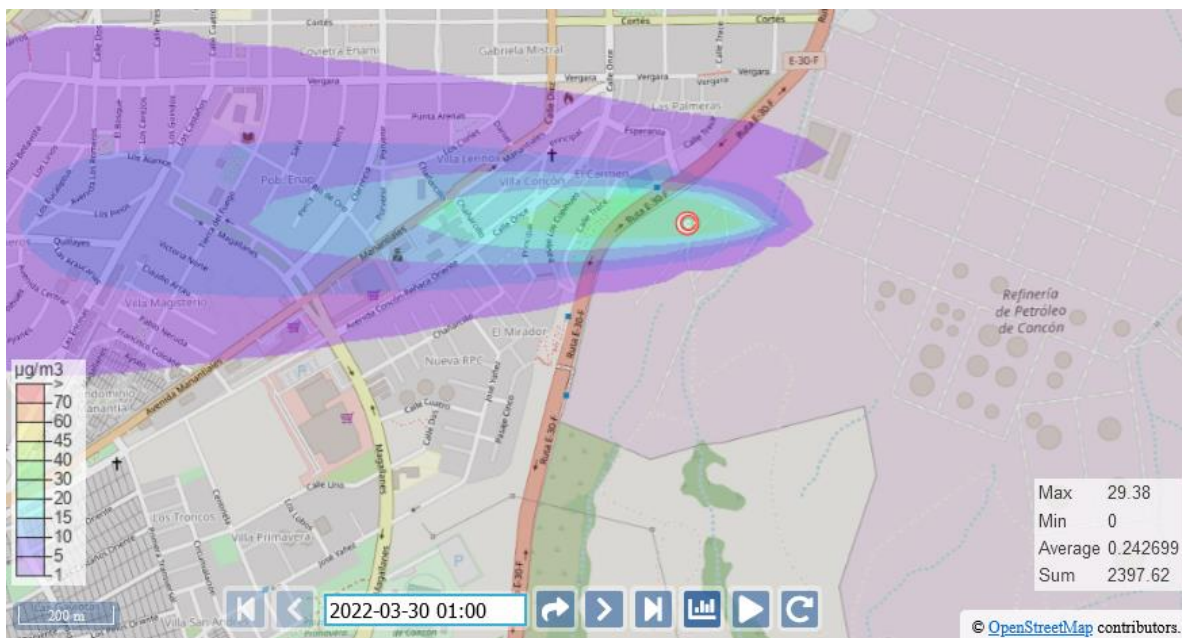


Figura 35 Simulación 2022-03-30 01:00, 40 metros de altura

Fuente: Elaboración propia

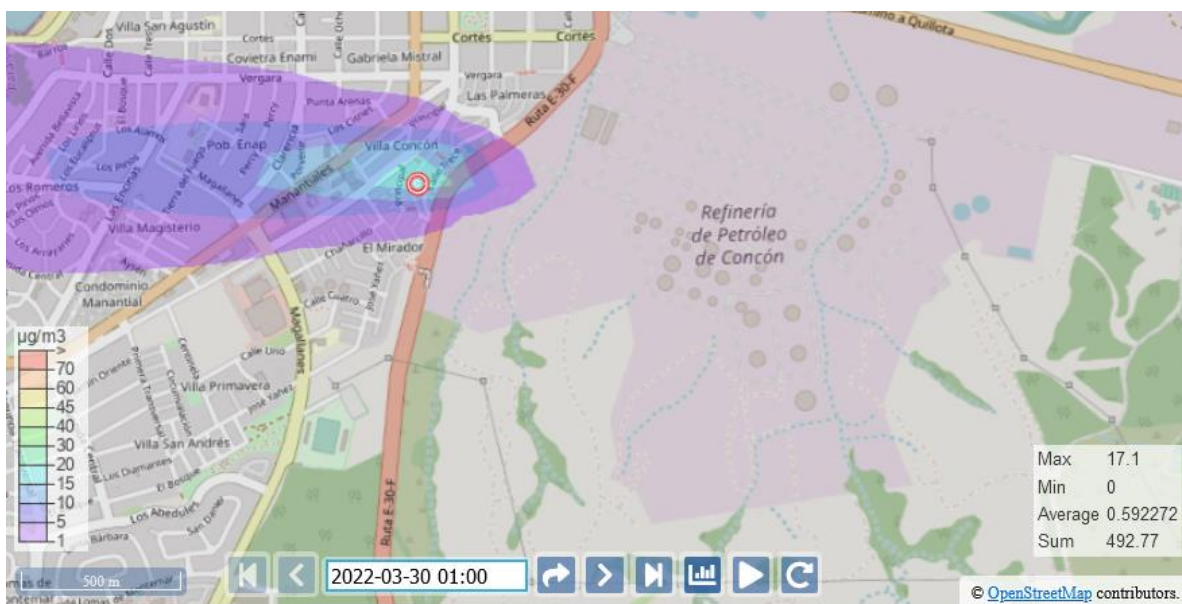


Figura 36 Simulación 2022-03-30 01:00, 60 metros de altura

Tabla 15 Resultados simulaciones a distintas alturas

Altura [m]	Valor máximo [µg/m3]	Valor promedio [µg/m3]	Valor Total [µg/m3]
2	29,36	0,24262	2445,61
20	29,36	0,24262	2445,61
40	29,38	0,242699	2397,62
60	17,1	0,592272	492,77

Fuente: Elaboración propia

Tal como se observa en la tabla 15 la emisión máxima disminuye a una mayor altura, mientras que la cantidad total presente de SO₂ disminuye a medida que aumenta la altura de la modelación, lo cual puede ser producto de la dispersión atmosférica, es decir, al transporte y mezcla de contaminantes en el aire, producto de la velocidad y/o dirección del viento, elevación de la pluma y de la turbulencia del aire. Sin embargo, se observa que entre los 2 y 40 metros no hay mayor variación en los resultados, lo cual puede ser producto de las limitaciones del modelo utilizado, ya que para estos casos se recomienda utilizar modelos de dinámica de fluidos que tienen una mayor precisión y son realizados por consultorías especializadas.

11. Análisis según tipo de fuente de emisión

En este análisis se hizo un análisis para determinar el tipo de fuente de ENAP Refinería Aconcagua que aporta una mayor cantidad de SO₂. Para esto se clasificaron las fuentes de emisión y se realizaron simulaciones según fuentes considerando periodos donde la velocidad del viento no superara los 2 m/s para asegurar la calidad de los datos.

11.1 Antorchas

Tabla 16 Resultados modelación de Antorchas

Fecha	Valor máximo [µg/m ³]	Valor promedio [µg/m ³]	Valor total [µg/m ³]
2022/03/02 07:00	16,23	0,100239	427,32
2022/03/02 08:00	22,9	0,06974	297,3
2022/03/03 02:00	17,11	0,0813	346,4
2022/03/03 05:00	16,9	0,0935	398,51

Fuente: Elaboración propia

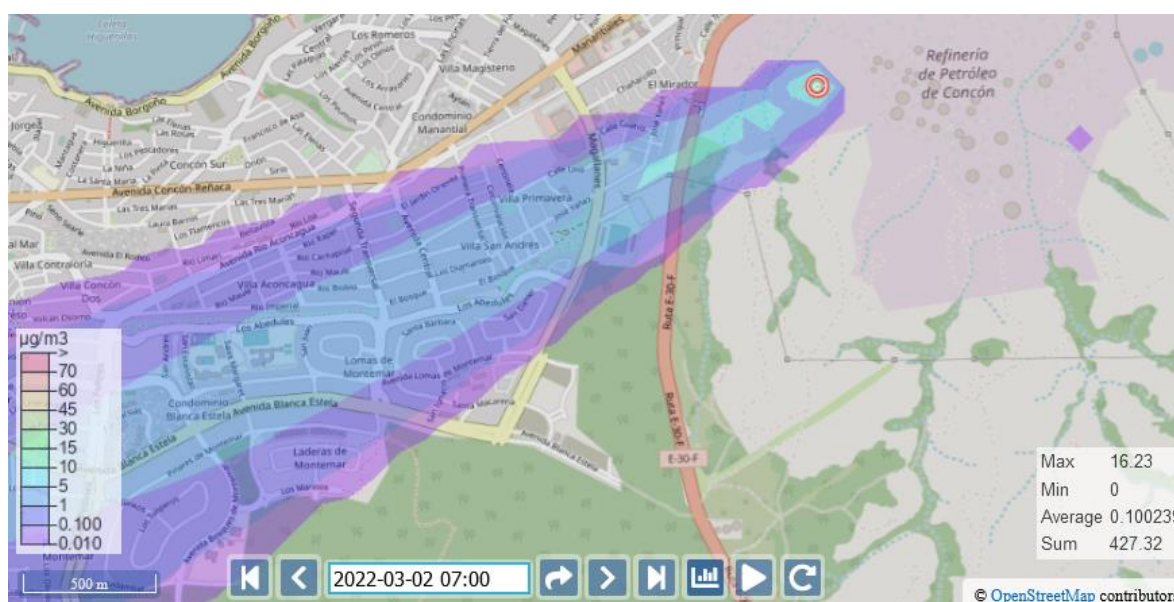


Figura 37 Modelación Antorchas 2022-03-02 07:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

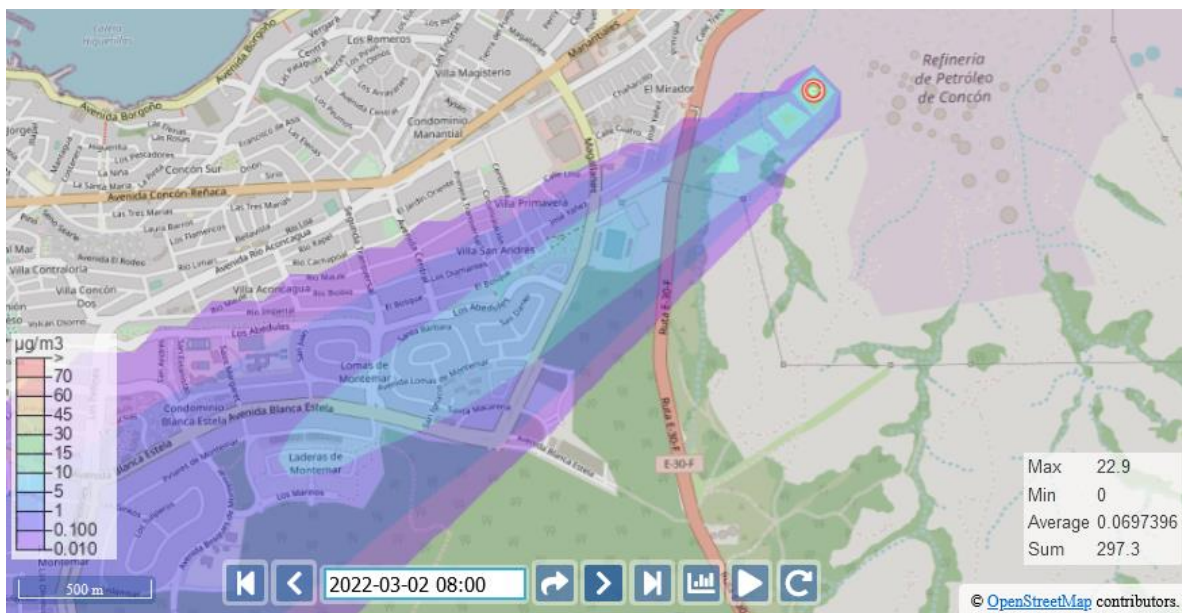


Figura 38 Modelación Antorchas 2022-03-02 08:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

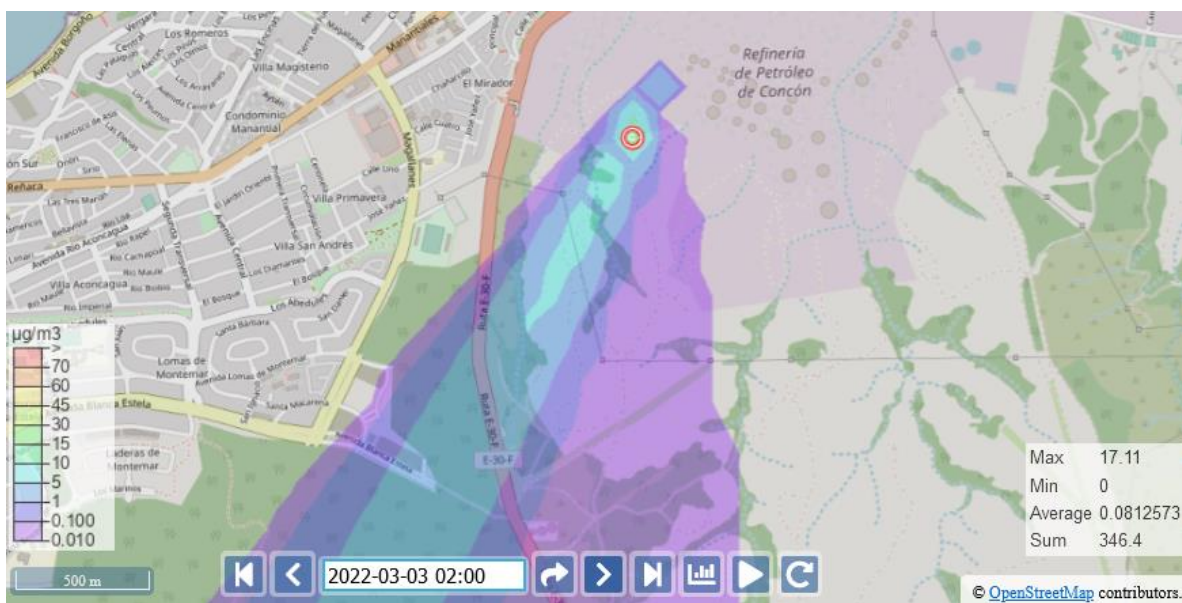


Figura 39 Modelación Antorchas 2022-03-03 02:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

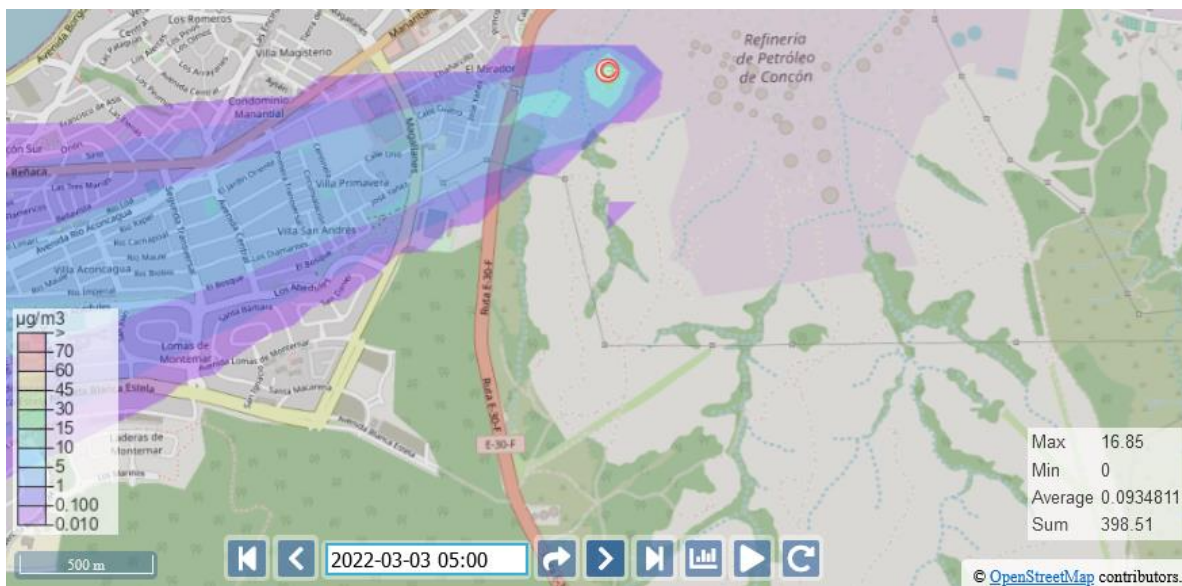


Figura 40 Modelación Antorchas 2022-03-03 05:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

11.2 Hornos

Tabla 17 Resultado simulaciones hornos

Fecha	Valor máximo [µg/m³]	Valor promedio [µg/m³]	Valor total [µg/m³]
2022/03/02 07:00	0,1785	0,0032	13,6
2022/03/02 08:00	0,1553	0,00203	8,64
2022/03/03 02:00	0,2084	0,00223	9,51
2022/03/03 05:00	0,188	0,00297	12,7

Fuente: Elaboración propia

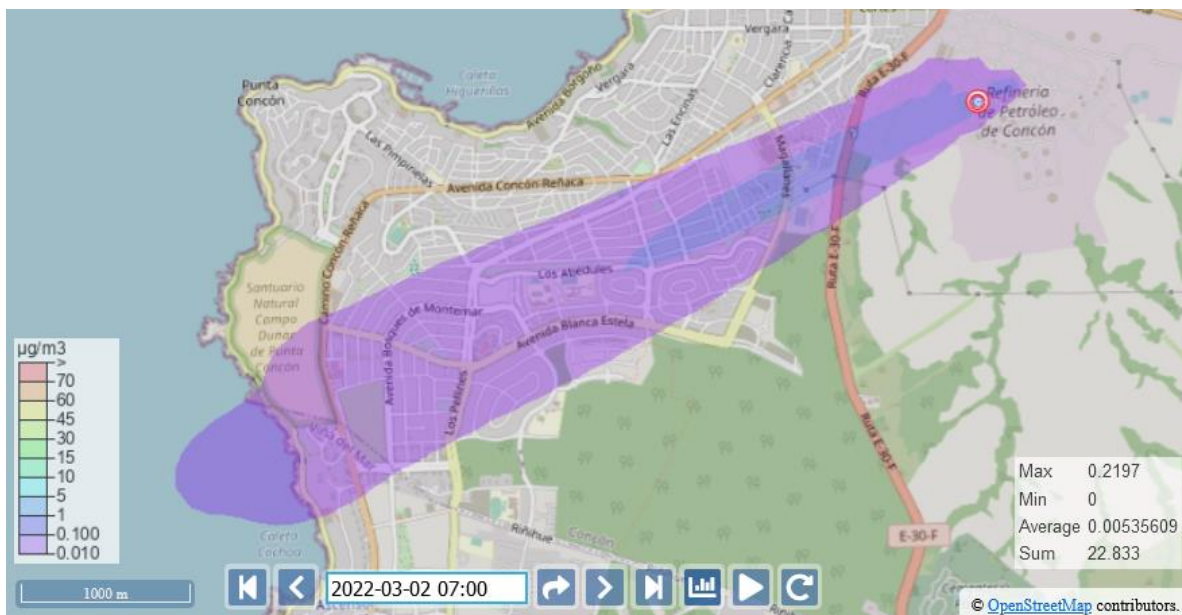


Figura 41: Modelación Hornos 2022-03-02 07:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

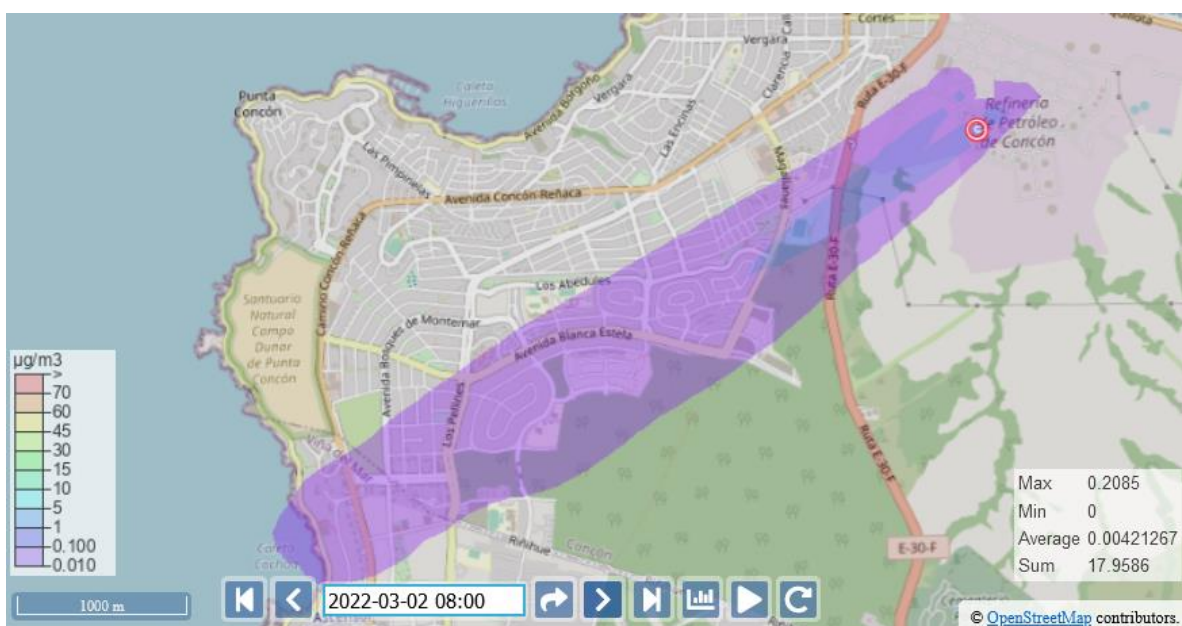


Figura 42: Modelación Hornos 2022-03-02 08:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

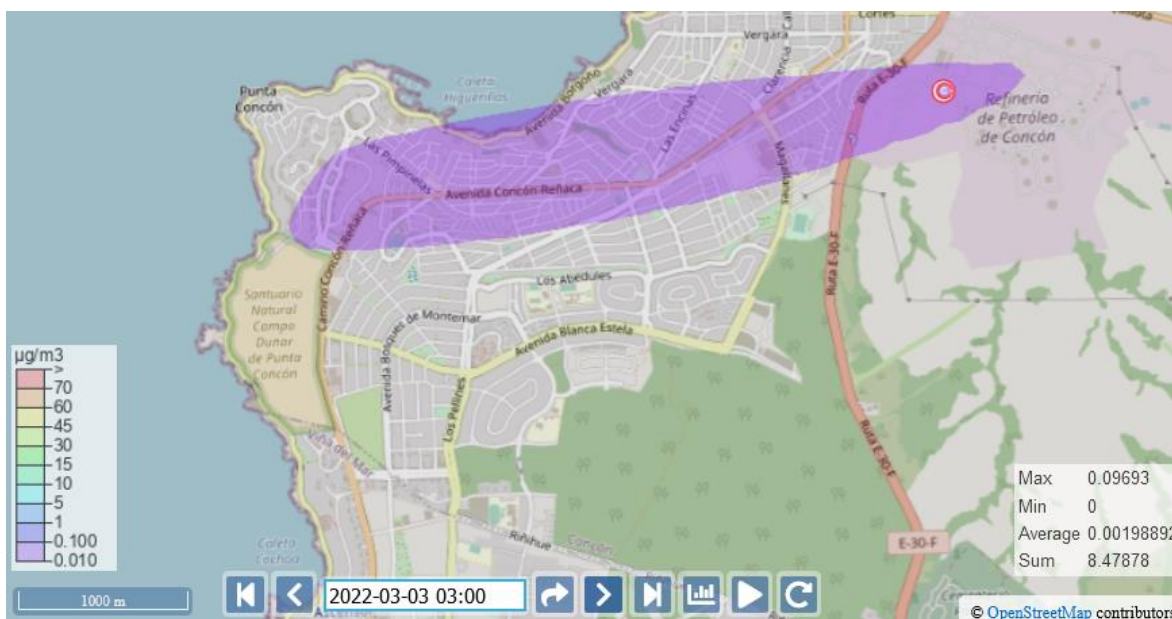


Figura 43: Modelación Hornos 2022-03-03 02:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

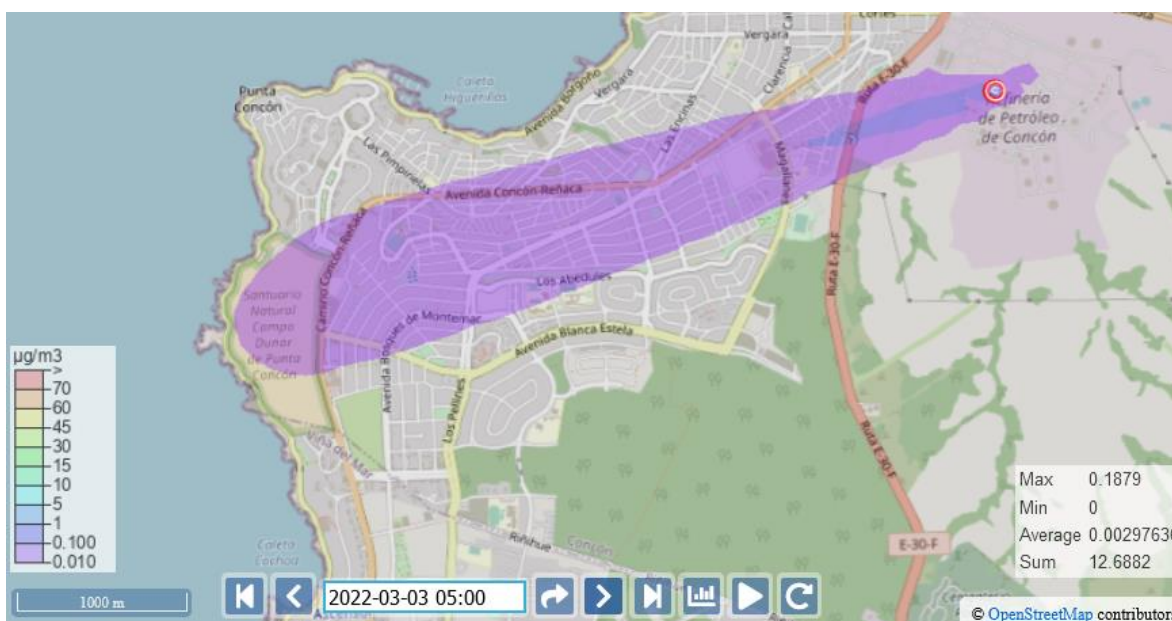


Figura 44: Modelación Hornos 2022-03-03 05:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

11.3 Calderas

Tabla 18 Resultado simulaciones de calderas

Fecha	Valor máximo [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Valor promedio [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Valor total [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
2022/03/02 07:00	0,38	0,0028	11,8
2022/03/02 08:00	0,57	0,0036	15,33
2022/03/03 02:00	0,32	0,0022	9,2
2022/03/03 05:00	0,39	0,0023	9,85

Fuente: Elaboración propia

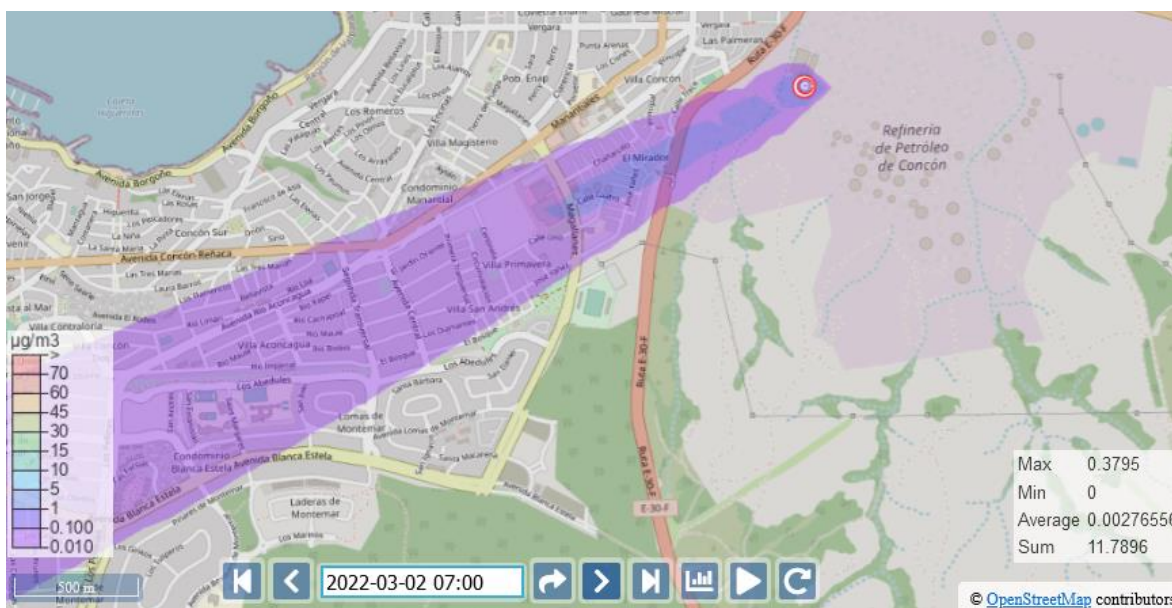


Figura 45: Modelación Calderas 2022-03-02 07:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

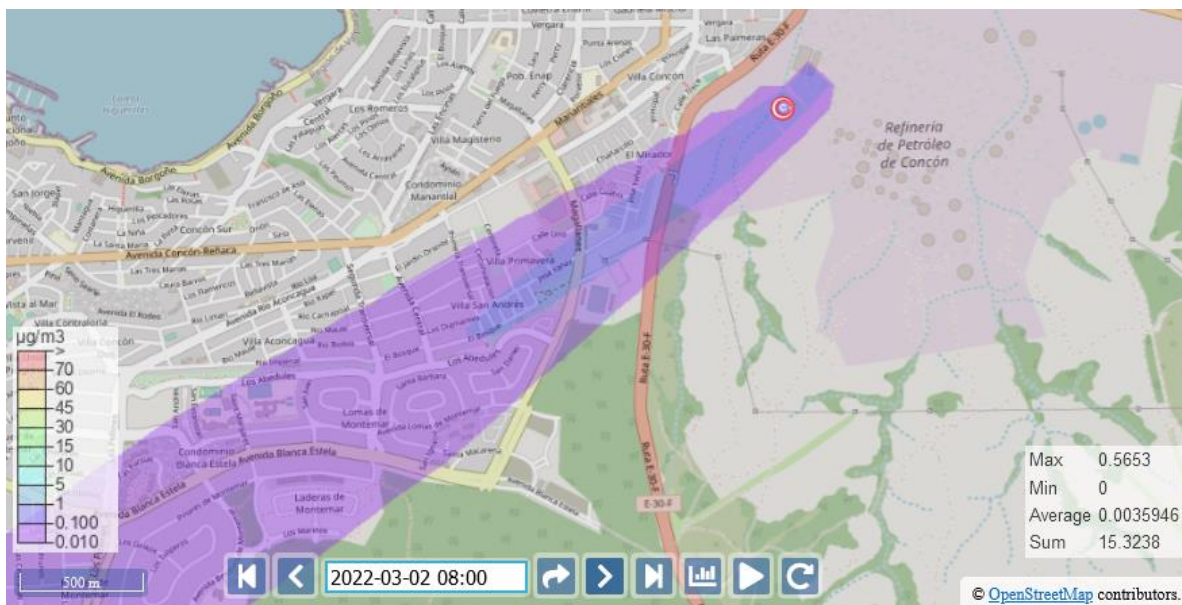


Figura 46: Modelación Calderas 2022-03-02 08:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

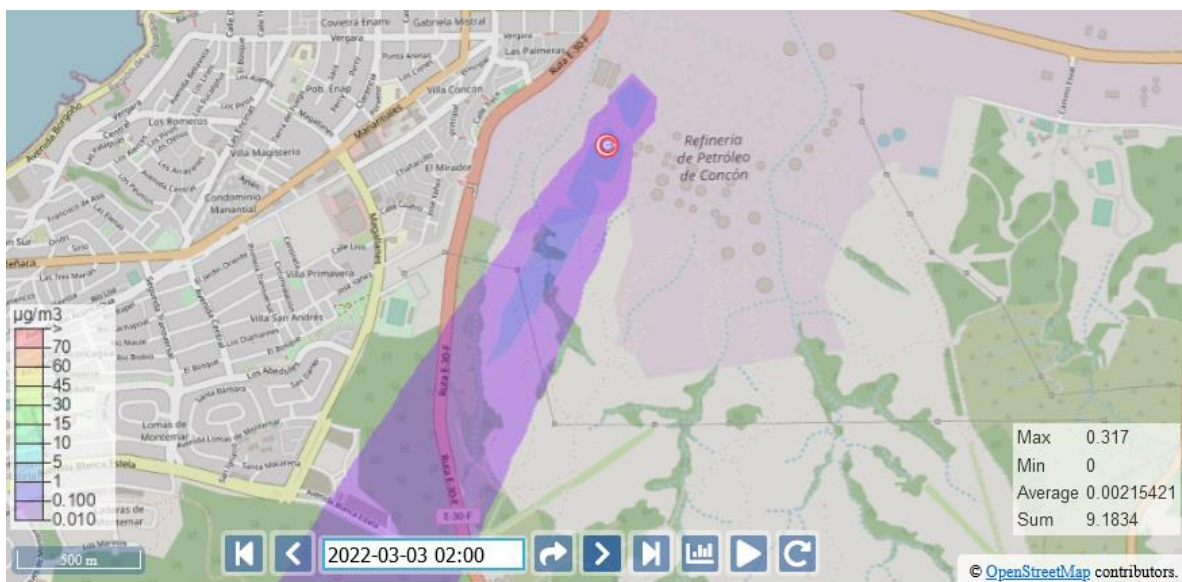


Figura 47: Modelación Calderas 2022-03-03 02:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

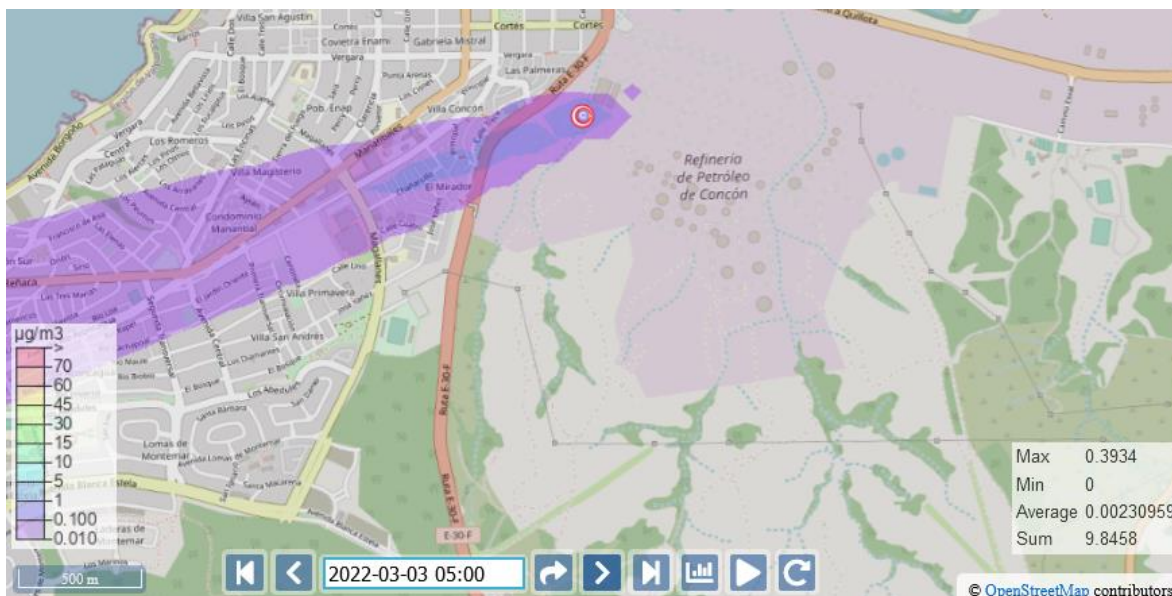


Figura 48: Modelación Calderas 2022-03-03 05:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

11.4 Plantas de azufre

Tabla 19 Resultado de simulaciones de plantas de azufre

Fecha	Valor máximo [µg/m³]	Valor promedio [µg/m³]	Valor Total [µg/m³]
2022/03/02 07:00	60,3	0,679	2885,3
2022/03/02 08:00	57,4	0,6	2536,1
2022/03/03 02:00	64,5	0,6	2558,22
2022/03/03 05:00	65,7	0,63	2705,9

Fuente: Elaboración propia

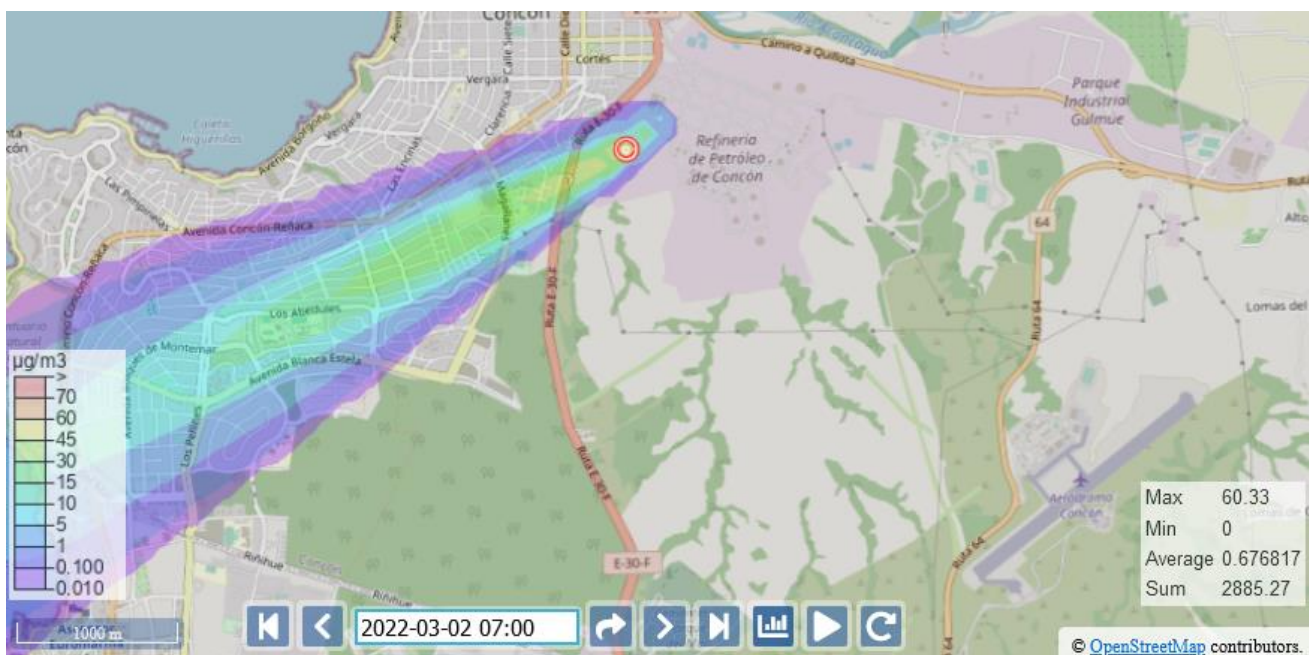


Figura 28 Modelación plantas de azufre 2022-03-02 07:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

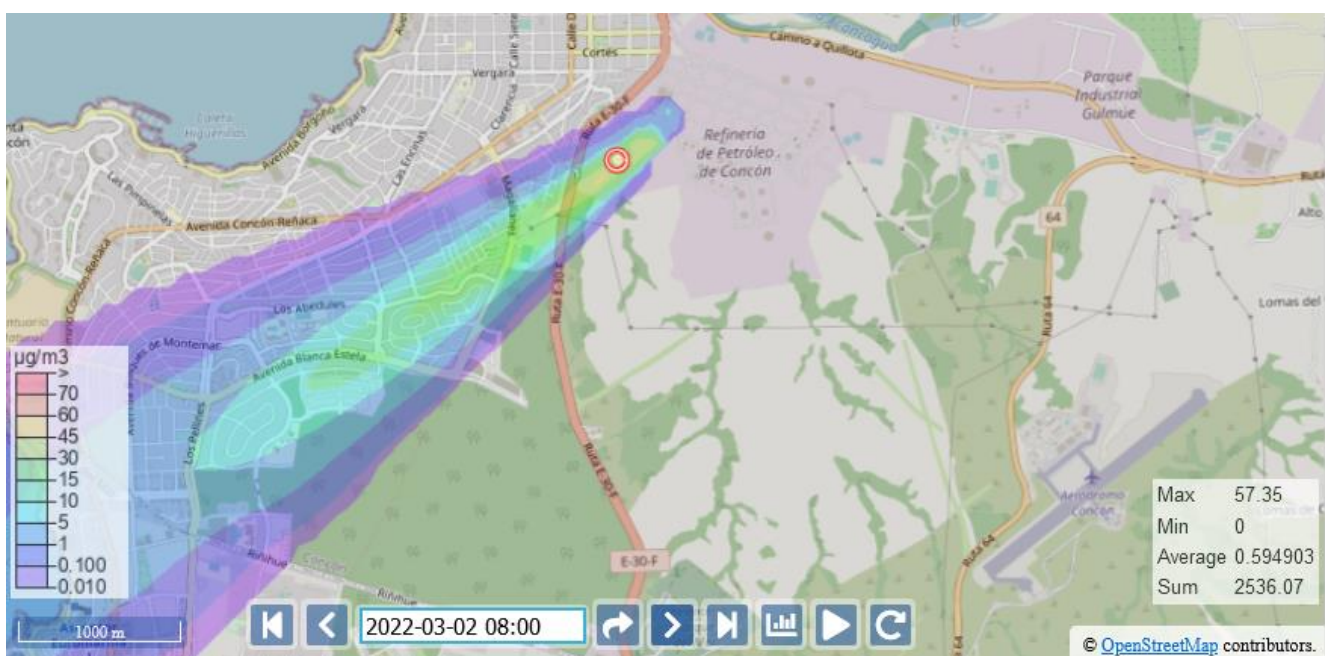


Figura 29 Modelación plantas de azufre 2022-03-02 08:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro



Figura 49 Modelación plantas de azufre 2022-03-03 02:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

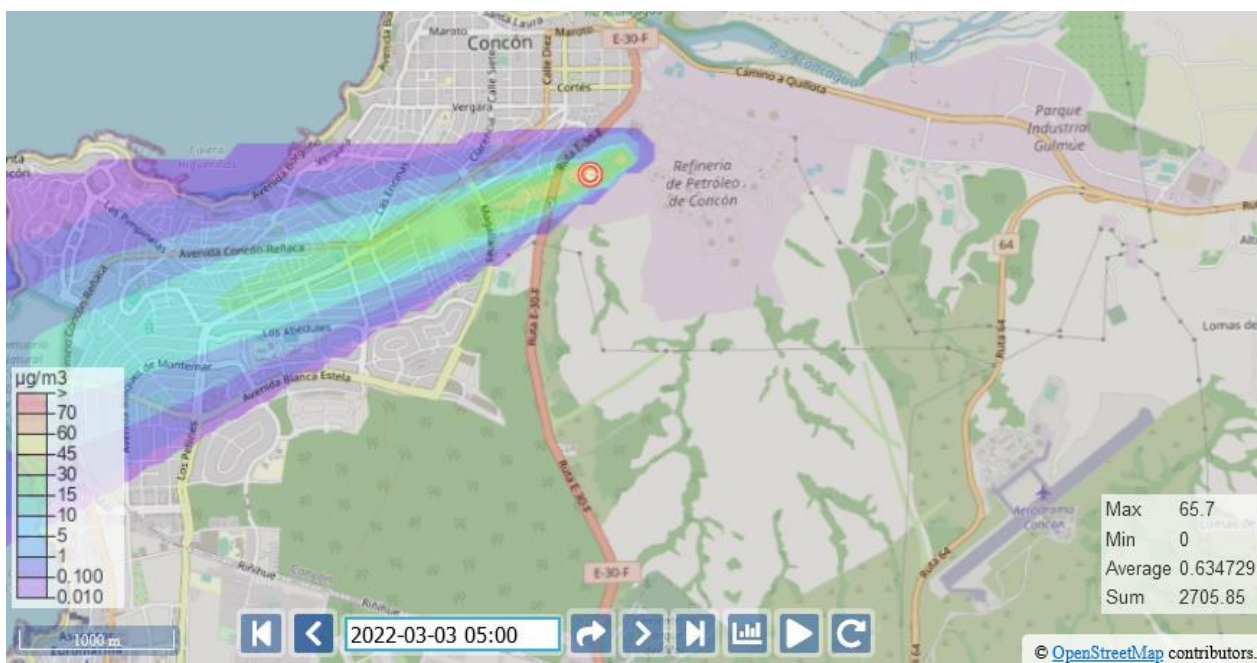


Figura 50 Modelación plantas de azufre 2022-03-03 05:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

11.5 Cogeneradora

Tabla 20 Resultado simulaciones cogeneradora

Fecha	Valor máximo [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Valor promedio [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Valor Total [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
2022/03/02 07:00	1,19	0,0012	5
2022/03/02 08:00	1,093	0,00055	2,3
2022/03/03 02:00	0,31	0,00041	1,7
2022/03/03 05:00	2,67	0,0021	8,6

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

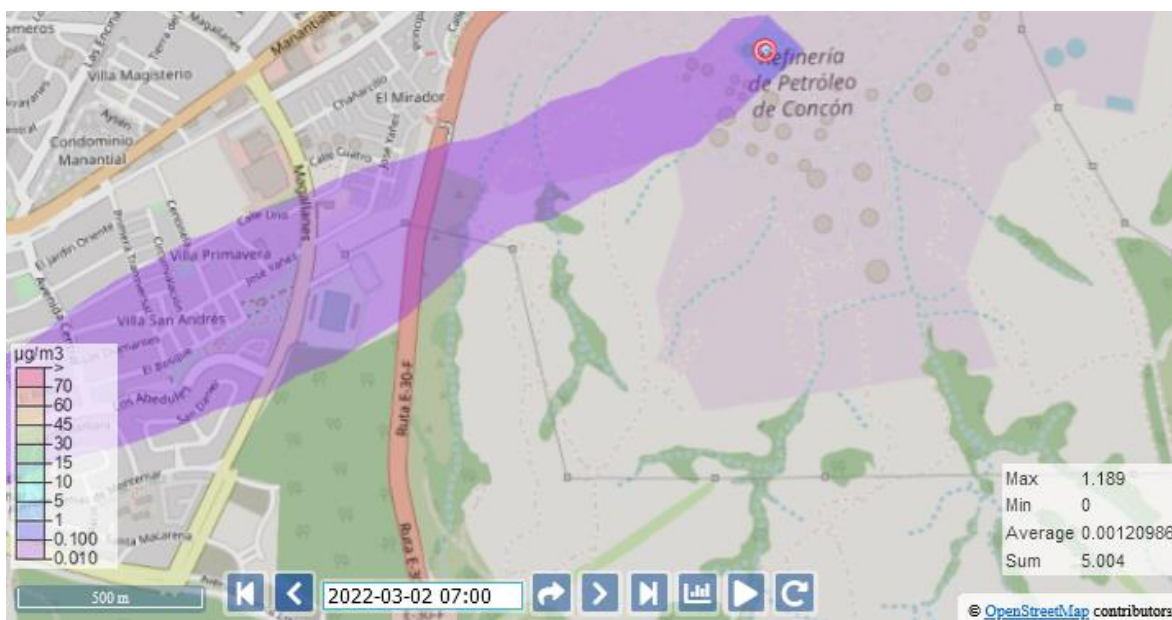


Figura 51 Modelación cogeneradora 2022-03-02 07:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

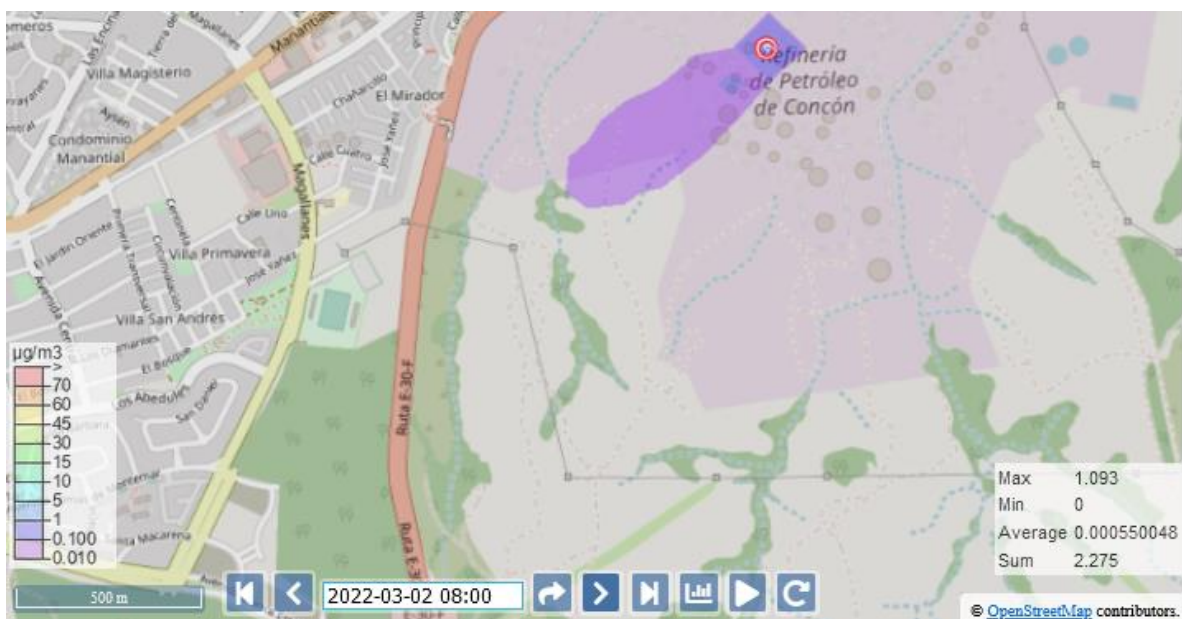


Figura 52 Modelación cogeneradora 2022-03-02 08:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

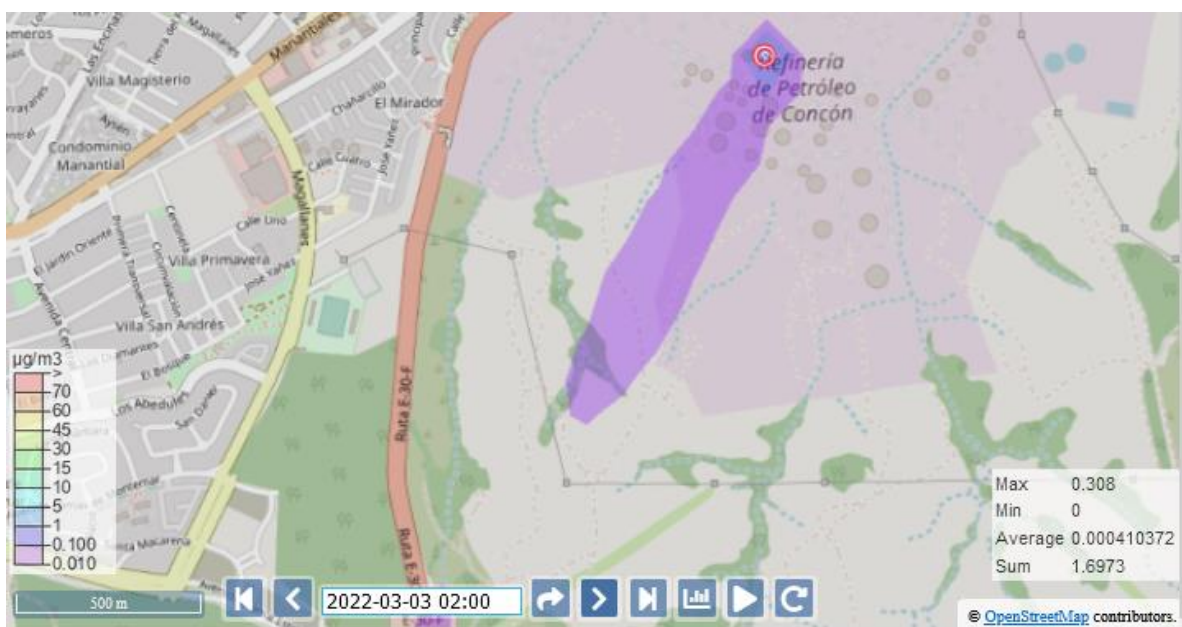


Figura 53 Modelación cogeneradora 2022-03-03 02:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

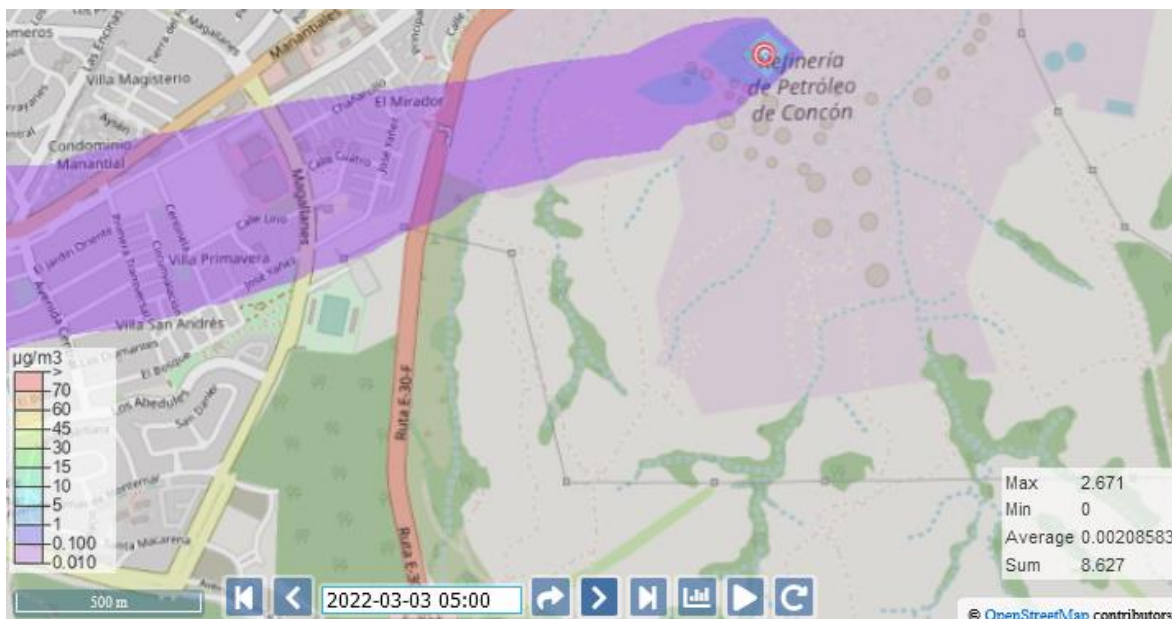


Figura 54 Modelación cogeneradora 2022-03-03 05:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

11.6 Cracking catalítico

Tabla 21 Resultados simulaciones cracking catalítico

Fecha	Valor máximo [µg/m ³]	Valor promedio [µg/m ³]	Valor Total [µg/m ³]
2022/03/02 07:00	6,8	0,043	155,4
2022/03/02 08:00	5,8	0,019	69,1
2022/03/03 02:00	7,2	0,024	86,3
2022/03/03 05:00	4,7	0,04	143,6

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

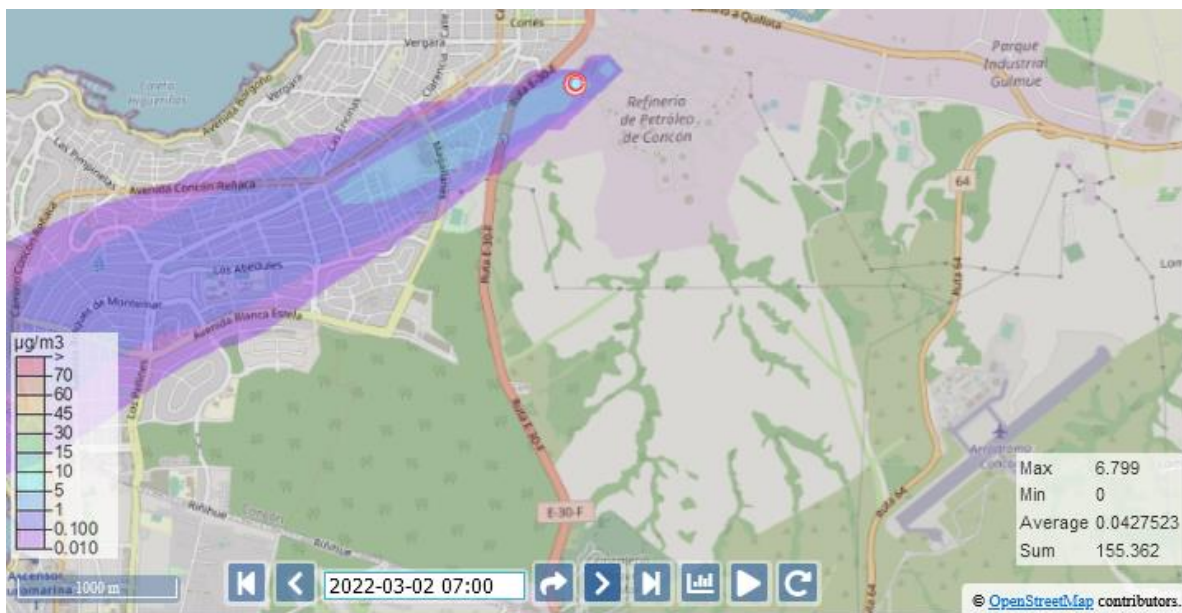


Figura 55 Modelación cracking catalítico 2022-03-02 07:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

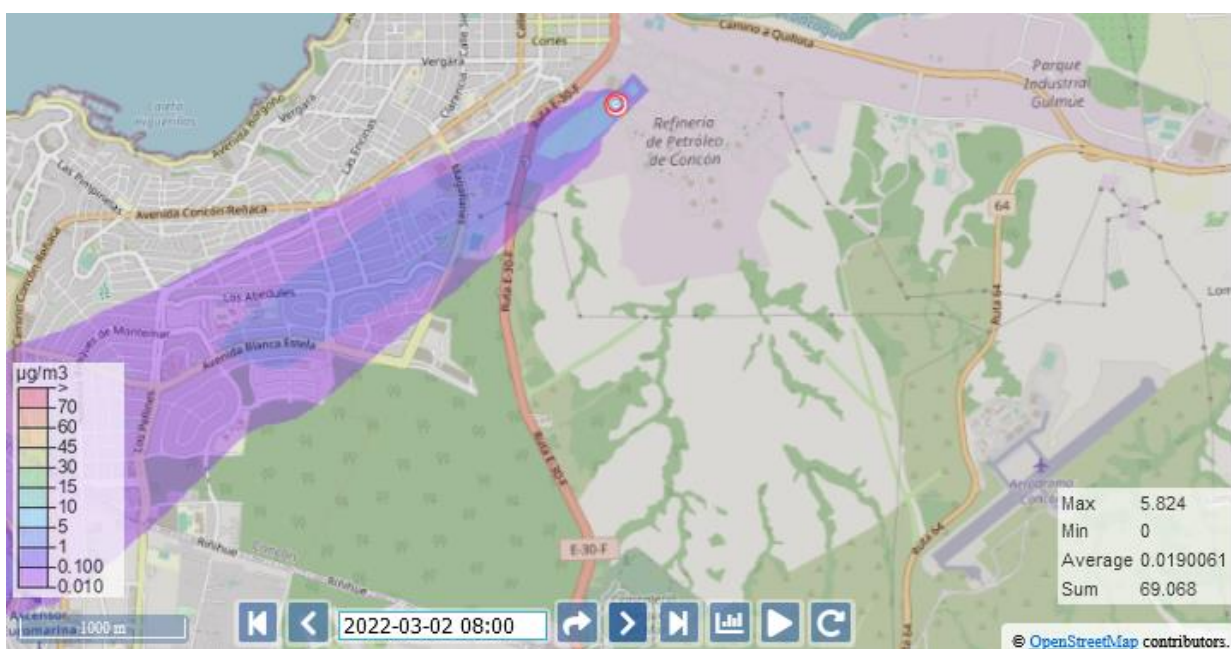


Figura 56 Modelación cracking catalítico 2022-03-02 08:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

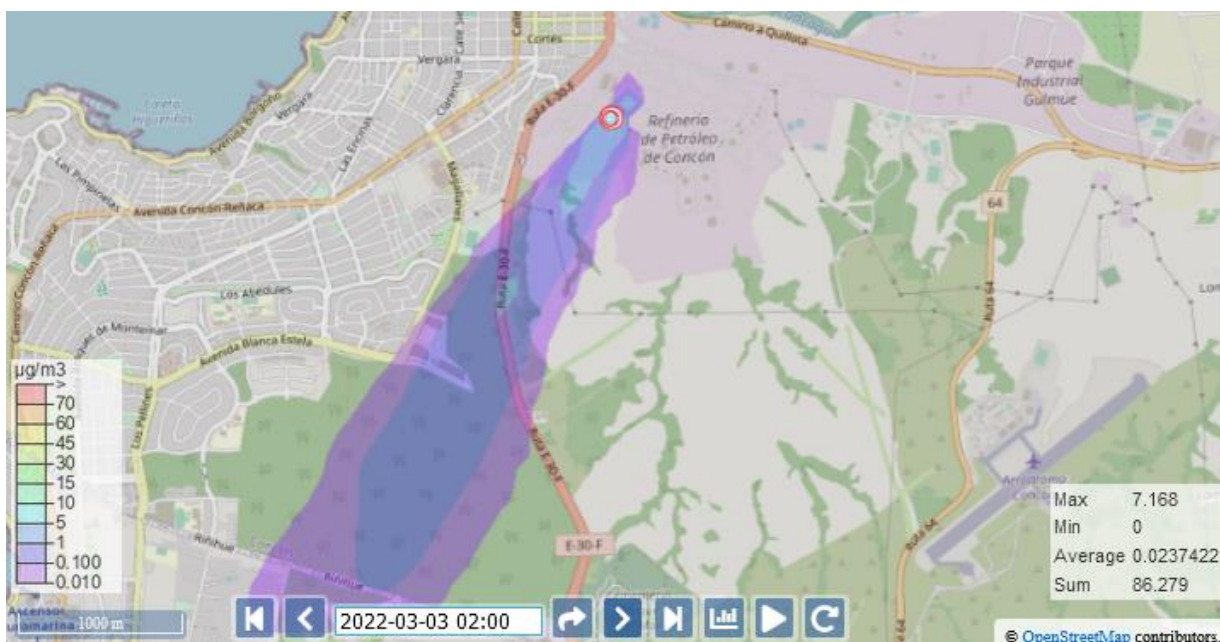


Figura 57 Modelación cracking catalítico 2022-03-03 02:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

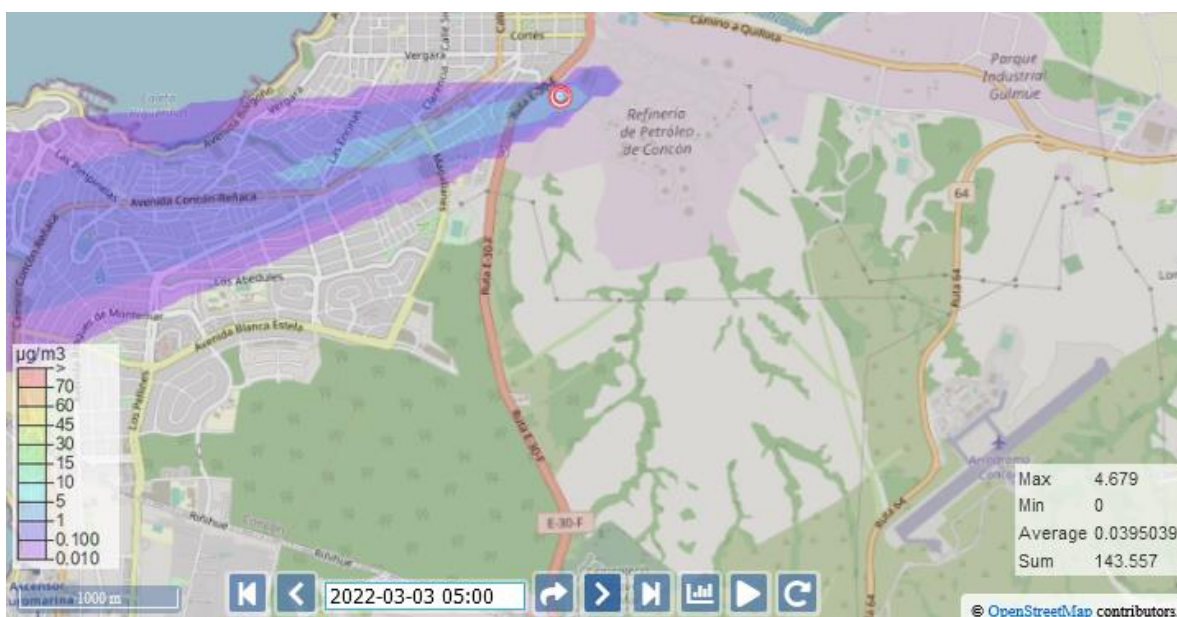


Figura 58 Simulación cracking catalítico 2022-03-03 02:00

Fuente: Elaboración propia por medio de Airviro

Al observar las simulaciones realizadas para las Calderas, Cogeneradora, Hornos, Plantas de Azufre y Antorchas se puede observar que las plantas de azufre son la fuente que mayores inmisiones de SO_2 genera, seguido de las antorchas, cracking catalítico, cogeneradora, calderas y hornos. Las simulaciones arrojan que la mayor fuente de emisión de SO_2 en orden decreciente son las plantas de azufre, antorchas, calderas y hornos, lo cual se muestran las gráficas de la 60 a la 65.

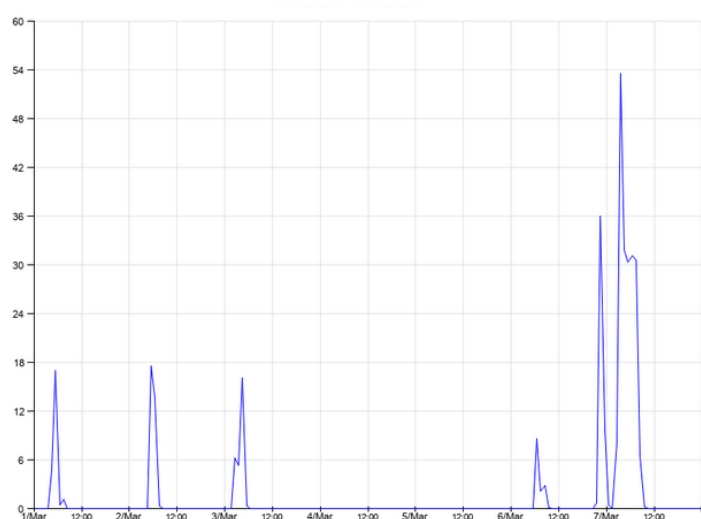


Figura 59 Inmisiones de SO_2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] de las plantas de azufre captadas por las estaciones Concón, Junta de vecinos y UMA

Fuente: Elaboración propia a partir de la información proporcionada por Airviro

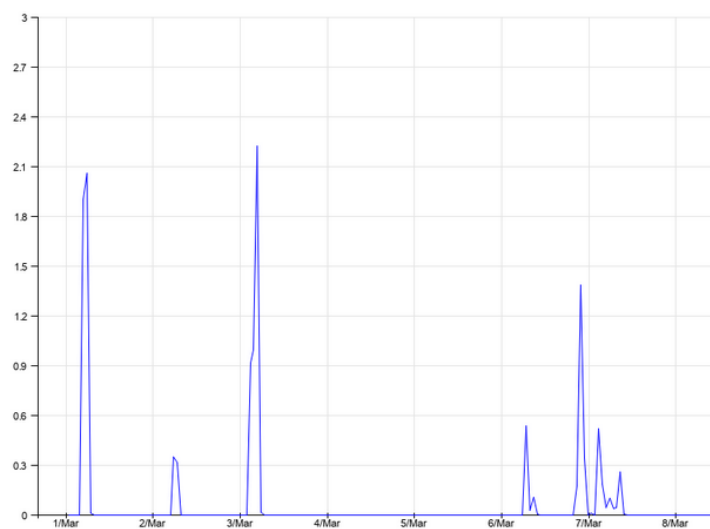


Figura 60 Inmisiones de SO_2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] de las antorchas captadas por las estaciones Concón, Junta de vecinos y UMA

Fuente: Elaboración propia a partir de la información proporcionada por Airviro

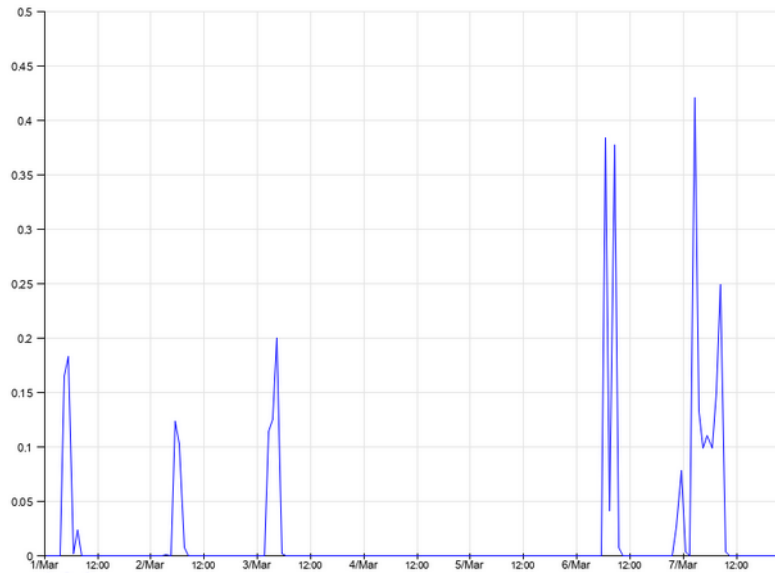


Figura 61 Inmisiones de SO₂ [ug/m³] de las calderas captadas por las estaciones Concón, Junta de vecinos y UMA

Fuente: Elaboración propia a partir de la información proporcionada por Airviro

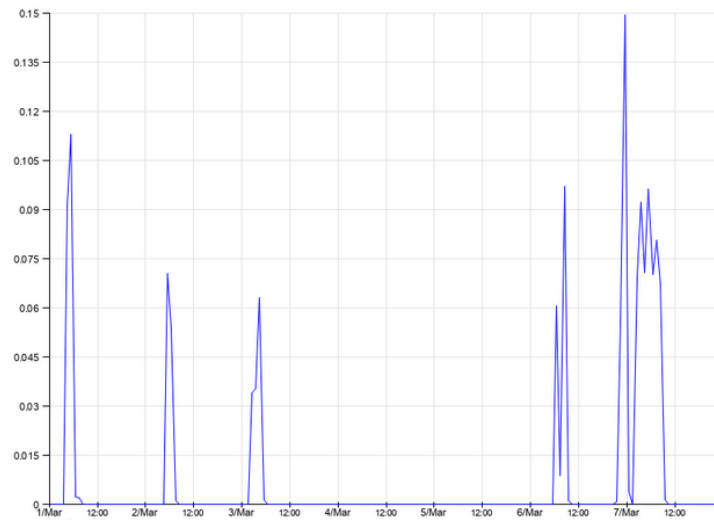


Figura 62 Inmisiones de SO₂ [ug/m³] de los hornos captadas por las estaciones Concón, Junta de vecinos y UMA

Fuente: Elaboración propia a partir de la información proporcionada por Airviro

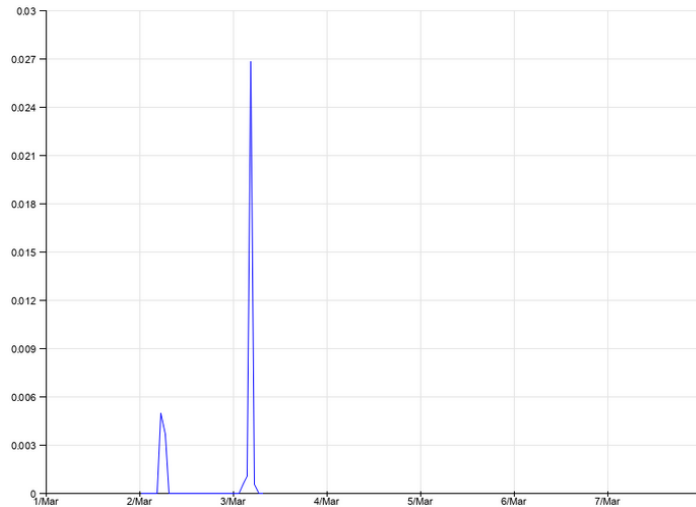


Figura 63 Inmisiones de SO_2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] de la cogenerada captadas por estaciones Concón, Junta de Vecinos y UMA

Fuente: Elaboración propia a partir de la información proporcionada por Airviro

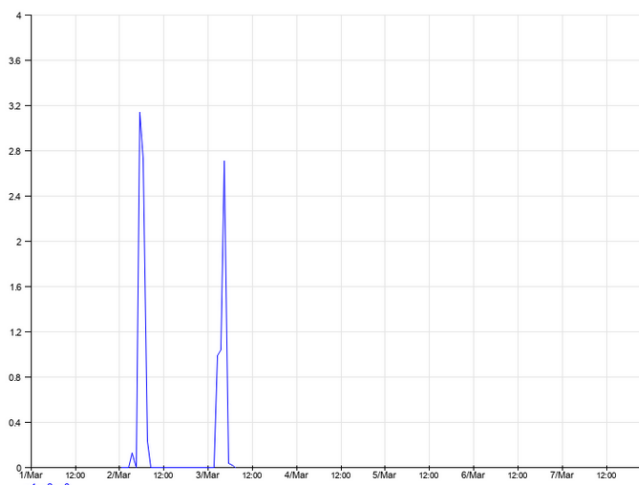


Figura 64 Inmisiones de SO_2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] de cracking catalítico captadas por las estaciones Concón, Junta de Vecinos y UMA

Fuente: Elaboración propia a partir de la información proporcionada por Airviro

Al utilizar la simulación para determinar el tipo de fuente que más inmisiones de SO_2 aporta, permite estudiar situaciones anómalas como reclamos por malos olores o emisiones visibles en el sector. Además, se puede hacer revisión a los datos históricos y variar los valores de ingreso para tener una idea de los efectos que ciertas maniobras podrían tener en la calidad del aire. Por último, es importante mencionar que no solo se puede simular las fuentes de emisión clasificadas según su categoría, sino que se pueden simular fuentes puntuales, brindando una gran herramienta al momento de buscar el origen de algún episodio anómalo, toma de decisiones y la aplicación de medidas correctivas.

12 Sugerencias y recomendaciones

12.1 Pronóstico de calidad del aire

Se recomienda utilizar la simulación realizada para generar un pronóstico de calidad del aire. Para esto se configuró el pronóstico meteorológico gratuito de ‘OpenWeather’, el cual es un servicio en línea que proporciona datos meteorológicos globales a través de API (interfaz de programación de aplicaciones), incluidos datos meteorológicos actuales, pronósticos, predicciones inmediatas y datos meteorológicos históricos para cualquier ubicación geográfica. Este brinda información meteorológica de 8 días como se observa en las figuras 66 y 67. Cabe mencionar que las predicciones meteorológicas son corregidas de forma horaria, por lo que esta será más exacta para un menor periodo de tiempo.

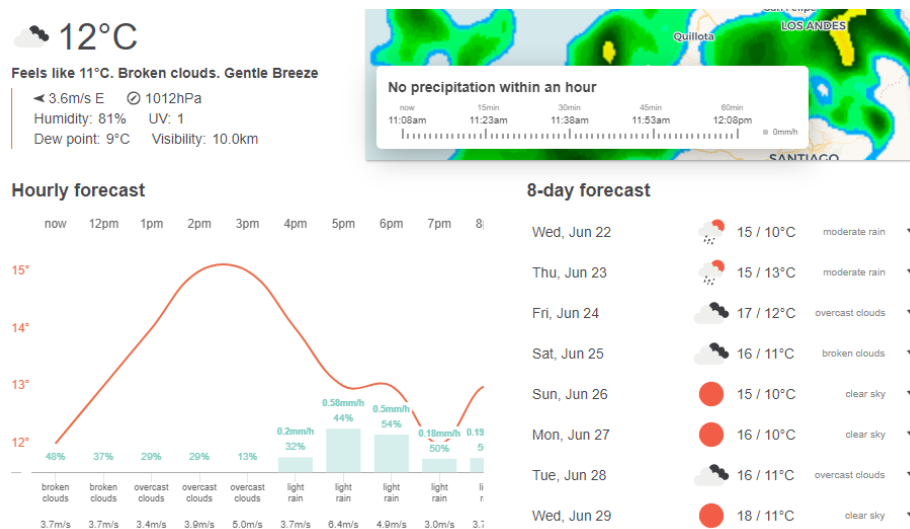


Figura 65 Pronóstico para 8 días de Openweather

Fuente: Operweather.cl

```

<weatherdata>
  <location>
    <name>Concón</name>
    <type/>
    <country>CL</country>
    <timezone>-14400</timezone>
    <location altitude="0" latitude="-32.922" longitude="-71.5162" geobase="geonames" geobaseid="3893865"/>
  </location>
  <credit/>
  <meta>
    <lastupdate/>
    <caltime>0</caltime>
    <nextupdate/>
  </meta>
  <sun rise="2022-06-22T11:48:45" set="2022-06-22T21:47:18"/>
  <forecast>
    <time from="2022-06-22T15:00:00" to="2022-06-22T18:00:00">
      <symbol number="803" name="muy nuboso" var="04d"/>
      <precipitation probability="0.29"/>
      <windDirection deg="353" code="N" name="North"/>
      <windSpeed mps="3.88" unit="m/s" name="Gentle Breeze"/>
      <windGust gust="7.09" unit="m/s"/>
      <temperature unit="celsius" value="13.36" min="13.36" max="16.79"/>
      <feels_like value="12.58" unit="celsius"/>
      <pressure unit="hPa" value="1012"/>
      <humidity value="70" unit="%"/>
      <clouds value="broken clouds" all="83" unit="%"/>
      <visibility value="10000"/>
    </time>
  </forecast>
</weatherdata>

```

Figura 66 Base de datos pronóstico OpenWeather

Fuente: Openweather.cl

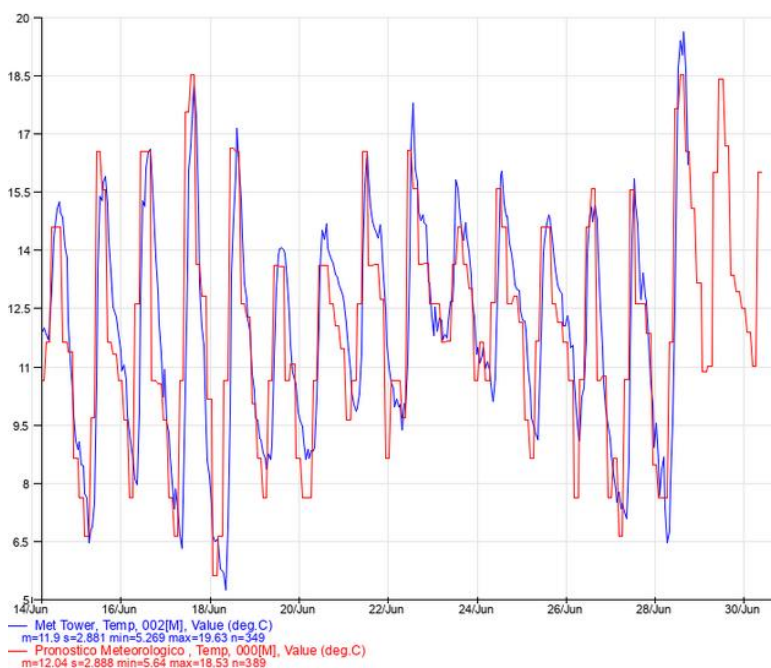
La información proporcionada por ‘Openweather’ fue conectada a la base de datos del sistema Airviro, creando 3 estaciones de pronósticos meteorológico que brindan datos futuros de temperatura, dirección y velocidad del viento, las cuales se observan a continuación en la figura 68.

Figura 67 Estaciones de predicción meteorológica

Fuente: Airviro

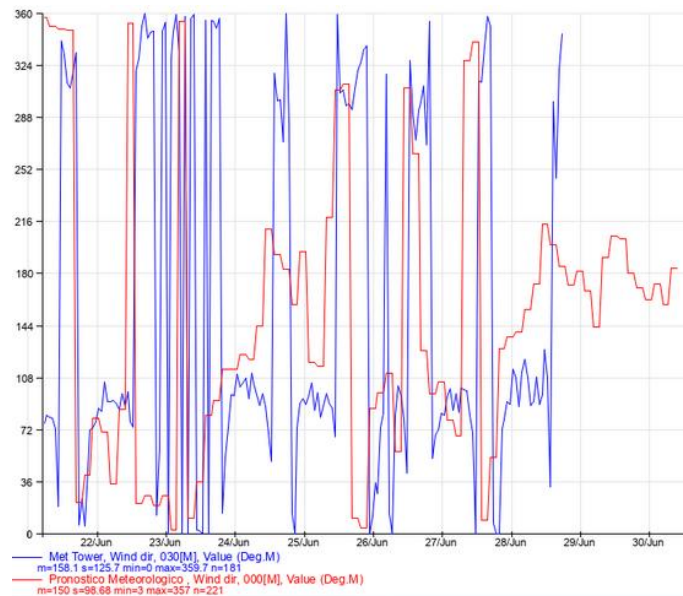
- Pronóstico MET 1 día: Pronostica información para 24 horas.
- Pronóstico MET 3 días: Pronostica información para 72 horas.
- Pronóstico meteorológico: Es una estación que proporciona información horaria, los cuales se corrigen de manera horaria, teniendo que, para una fecha más cercana, mayor será la calidad del pronóstico.

En las gráficas 13,14 y 15 se compara la información entregada por la estación meteorológica de la empresa con la información proporcionada por el pronóstico meteorológico, donde se observa que el pronóstico tiene un buen comportamiento para la temperatura y velocidad del viento. Mientras que para la dirección de la estación meteorológica y el pronóstico son muy distintas, lo que disminuye la calidad del pronóstico de calidad del aire.



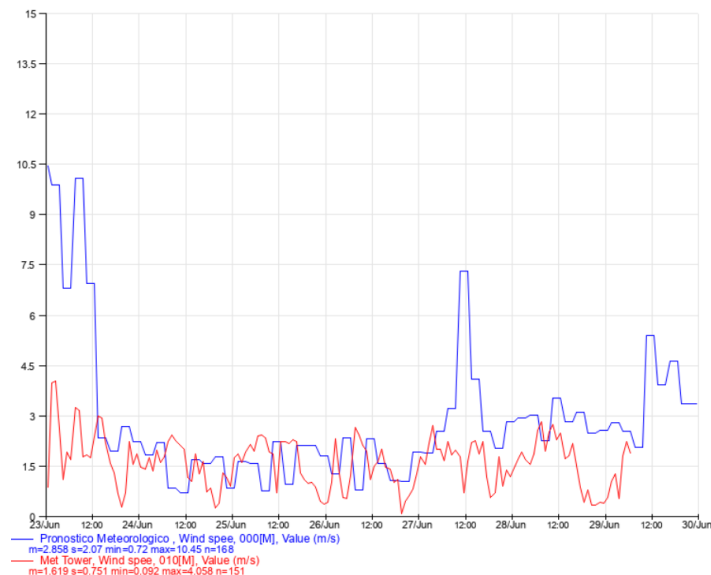
Gráfica 13 Comparación de datos de temperatura de la estación meteorológica vs estación pronóstico meteorológico

Fuente: Airviro



Gráfica 14 Comparación dirección del viento estación meteorológica vs estación pronóstico meteorológico

Fuente: Airviro



Gráfica 15 Comparación velocidad del viento estación meteorológica vs estación pronóstico meteorológico

Fuente: Airviro

Esta información puede utilizarse para en un futuro crear simulación predictiva de calidad del aire y utilizar esta herramienta como apoyo para la toma de decisiones por parte de la operación. Sin embargo, se recomienda comprar datos

meteorológicos, debido a que estos presentan una mayor calidad y definición, lo que proporcionaría mejores resultados tanto para simulaciones pasadas, como predictivas.

12.2 Estación meteorológica

12.2.1 Ubicación estación meteorológica

Uno de los factores más importantes a considerar al momento de considerar la calidad de los datos de una simulación es la ubicación de la torre meteorológica, debido a que a partir de esta se ve la factibilidad de algunos modelos e impacta directamente en la calidad de datos entregados por esta. En ENAP Refinería Aconcagua se cuenta con una torre meteorológica propia, la cual fue instalada en Abril de 1997, año en el cual no existían muchas de las estructuras que actualmente están cerca de ella.

A continuación, se detallarán los puntos cruciales que deben ser considerados si se quiere mejorar la calidad de los datos proporcionados por una estación meteorológica.

1. La estación debe ser instalada en un terreno nivelado con dimensión mínima de 5 x 5 metros e idealmente de dimensión 10 x 10 metros. Además, este debe ser situado en un espacio despejado de 50 x 50 m como mínimo y el suelo debe estar cubierto de pasto corto. Es importante mantener la nivelación de la estación, en especial luego de días con vientos fuertes o si la medición arroja una única dirección del viento. El detalle de las dimensiones mínimas e ideales se detallan a continuación en las figuras 69 y 70.

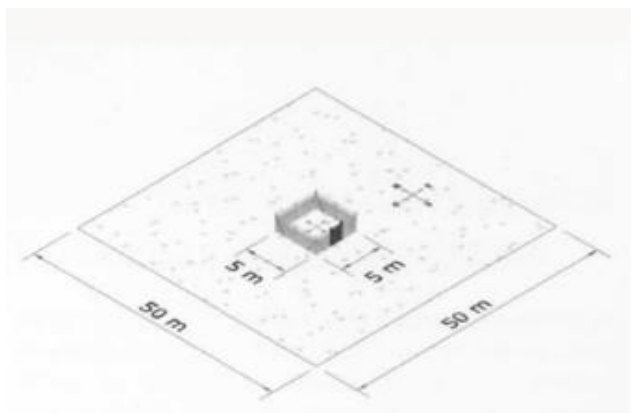


Figura 68 Espacio mínimo de la torre meteorológica

Fuente: Guía de compra de estaciones meteorológicas, Maldonado, Ruiz, Fuentes (2010)

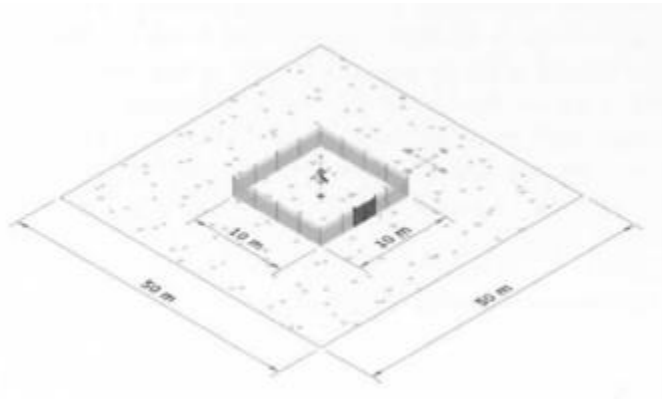


Figura 69 Espacio recomendado de la estación meteorológica

Fuente: Guía de compra de estaciones meteorológicas, Maldonado, Ruiz, Fuentes (2010)

Como se observa en la figura 71 la estación meteorológica no cumple con las dimensiones mínimas de terreno, ubicándose en un sitio obstruido por los vehículos estacionados, un container de almacenamiento y una ‘switch house’.



Figura 70 Obstrucciones torre meteorológica

Fuente: Elaboración propia

2. El sitio deberá estar rodeado por un cercado de 1,8 metros de altura que impida el ingreso de animales o personas no autorizadas que puedan generar daños los equipos y/o interfiera en las mediciones.



Figura 71 Zona baja de la estación meteorológica

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura 72 no existe un cercado en la estación meteorológica, lo que permite que ingresen animales libremente a la zona baja de esta, pudiendo estropear algún instrumento de medición o cables.

3. Debe encontrarse fuera de elementos obstructores como árboles, edificios, paredes u otros. La distancia entre cualquier obstáculo y el instrumento de medición del viento debe ser de al menos 10 veces la altura del obstáculo, debido a que, si llegara a existir una obstrucción las mediciones de radiación solar, viento y/o temperatura se verían seriamente afectadas.

Como antes se mencionó existe presencia de elementos obstructores cerca de la estación. Además, se debe considerar los altos equipos de la refinería, lo cuales pueden afectar las mediciones de esta como se observa en la figura 73.



Figura 72 Panorámica de Refinería Aconcagua

Fuente: Elaboración propia

4. Esta no debe ubicarse en la parte más baja de una depresión, ni en el sector de mayor altura, sino que deben estar en el sitio que sea lo más representativo. De no ser así las mediciones presentarán peculiaridades o máximos significativos.

Se recomienda realizar estudios para verificar que el sector en donde se ubica la estación meteorológica sea representativo para las condiciones del sector, debido a que la empresa se ubica en una depresión dentro del sector de Concón.

5. Se recomienda instalar un gabinete de fibra de vidrio, plástico u otro material resistente a la corrosión y que permita cuidar la caja electrónica de la humedad del sector.
6. La torre debe ser instalada en un sector alejado de zonas que produzcan calor o frío de forma artificial.

12.2.2 Sensores de la estación meteorológica

Para los sensores de la estación se recomienda que estos no se encuentren obstruidos para no alterar la calidad del dato medido. A continuación, se mencionan las recomendaciones para propiciar la calidad de los datos de los sensores.

Sensor de temperatura e higrómetro: Este debe situarse sobre un terreno plano, evitando superficies rocosas, de hormigón, colores oscuros, techos o césped regado. Este sensor debe ser montado sobre una garita meteorológica ventilada, donde no tenga exposición directa de la luz solar para evitar valores extremos, la altura con respecto al suelo debe estar entre los 1,25 y 2 metros, la distancia horizontal debe superar el doble de la altura del objeto más cercano y se aconseja una distancia mínima de 15 metros con respecto a cualquier fuente de humedad. Como se observa en la figura 74 el sensor de temperatura que se encuentra a 2 metros de altura, no supera en el doble de distancia de la altura del objeto más cercano. Además, este recibe gotas directamente de las torres de enfriamiento que pueden afectar la calidad de la medición.



Figura 73 Sensor de temperatura

Fuente: Elaboración propia

Pluviómetro: Se recomienda la instalación de un pluviómetro, el cual es un sensor que permite medir la lluvia caída, este debe ser instalado a una altura que esté entre 1,2 a 1,8 metros sobre el nivel del suelo, la distancia horizontal debe ser de 4 veces la altura del obstáculo más cercano, tiene que estar perfectamente nivelado con el suelo y no debe tener salpicaduras de agua. Este nos sirve para aplicar maneras correctivas para procedimientos de operación tomados para distintas condiciones de lluvia.

Anemómetro: Se recomienda estudiar la posición del anemómetro, el cual es un sensor que permite conocer la velocidad y dirección del viento, este deber

ser montado a 10 metros sobre el nivel del mar, lo cual es complejo, ya que generalmente las estaciones meteorológicas tienen todos los sensores integrados en uno solo. La distancia ideal con respecto a elementos horizontales es de 10 veces la altura de la obstrucción más cercana. En caso de que este se encuentre montado sobre un mástil, el mástil que lo sostiene debe extenderse horizontalmente a una distancia de 3 veces el diámetro del mástil. Se tiene que a 30 metros de altura la estación se cuenta con un anemómetro, el cual no cumple con la condición de tener una distancia ideal de 10 veces la altura de la obstrucción más cercana.

Otros factores para considerar:

1. Los sensores deben mantenerse alejados de fuentes de calor o frío, debido a que estas afectan la calidad de los datos proporcionados. Por esto se recomienda realizar estudios del entorno y cerciorarse que no haya ningún respiradero, calentador, torre de enfriamiento o chimenea cerca que afecte la calidad de la medición.

2. En caso de existir aspersores y/o sistemas de riego se debe controlar que estos no salpiquen sobre los sensores.

En conclusión, el mejor lugar para realizar las mediciones es un terreno despejado a la luz del sol y el viento, nivelado con respecto al suelo, cubierto por hierba corta y que esté libre de obstáculos (árboles y edificios). Además, se debe tener especial énfasis en que la estación no se encuentre en sectores con condiciones particulares como zonas altas o el fondo de una depresión.

12.3 Mejorar el monitoreo de las antorchas

Como se mencionó en el punto 4.2.1 las antorchas no cuentan con equipos, ni sensores que puedan medir la temperatura de la llama y la velocidad de salida de los gases previa a su combustión, lo cual dificulta que la simulación considere los peak cuando estos ocurran. Por lo que se sugiere invertir en equipos que midan estos parámetros y que permitan que estos ingresen a 'PI System' y 'Airviro' con el fin de crear una serie de tiempo que pueda mejorar la calidad de la modelación. Se recomienda que estos equipos sean de monitoreo automatizado, los cuales evalúan la zona de combustión de la antorcha con tecnología infrarroja. Existen equipos como el FlareGuardian de Zeeco, el cual fue el ganador del Premio 2018 de Hydrocarbon Processing a la Mejor Implementación de Salud, Seguridad y Medio Ambiente (HSE). Los beneficios de FlareGuardian van desde un monitoreo sin contacto, proporciona el

rendimiento de la antorcha, elimina los parámetros sustitutos, rápida respuesta, fácil instalación y mantenimiento. También existen sistemas como el Zeeco Verifeye, el cual está montado en el piloto de la antorcha, transmite el estado de cada llama piloto en tiempo real a un monitor a nivel y está diseñado para aplicaciones de altas temperaturas y se enfoca en la llama del piloto desde una distancia segura dentro de una carcasa del piloto sin contacto con ninguna zona afectada por la combustión. Por último, cabe mencionar que existe una gran cantidad de opciones, teniendo incluso que una cámara térmica podría dar una idea más realista del comportamiento de la llama de la antorcha.

12.4 Machine learning

Otra forma de mejorar la calidad de la modelación es por medio de ‘Machine Learning’, la cual es una forma de Inteligencia Artificial que permite aprender de los datos en lugar de aprender mediante la programación explícita. Un modelo de machine learning es la información que se genera al entrenar su algoritmo con datos. (“¿Qué es Machine Learning? - México | IBM”) Mediante Machine Learning permite que los modelos entrenen con conjuntos de datos antes de ser implementados. Una vez estos son entrenados se pueden utilizar en tiempo real y aprender de los datos, con el fin de mejorar la precisión y automatizar los modelos predictivos.

Las técnicas de machine learning poseen distintos enfoques basados en el tipo y volumen de los datos a tratar, teniendo las siguientes categorías:

Aprendizaje supervisado: Se comienza con un conjunto de datos establecidos y clasificados. Esta categoría busca identificar patrones que permitan un posterior análisis.

Aprendizaje no supervisado: Se utiliza para una gran cantidad de datos sin etiquetar. Este se realiza mediante procesos iterativos y se analizan datos sin intervención humana.

Aprendizaje de refuerzo: Este es un modelo de aprendizaje conductual. Este revise información del análisis de datos y guía al usuario hacia el mejor resultado. Este aprende a través de secuencias de prueba y error, lo que permite que una toma de decisiones exitosas conduzca a un mejor resultado.

Deep learning: Este es un método específico de Machine Learning que incorpora el uso de redes neuronales en capas sucesivas para aprender de los

datos. Este método es utilizado para aprender patrones no estructurados, pudiendo lidiar con abstracciones y problemas mal definidos.

En conclusión, el uso de Machine Learning mejoraría la calidad de los modelos predictivos desarrollado para ENAP Refinería Aconcagua, no solo a corto, sino a largo plazo por medio del entrenamiento constante del modelo, lo que llevaría a tener predicciones más precisas que permitirían evitar situaciones indeseadas en la empresa y adaptarse a los cambios que esta tenga.

12.5 Diámetro y altura efectiva de las antorchas (Flare)

Con el objetivo de obtener un modelo más representativo se recomienda implementar la altura y el diámetro efectivo de la llamarada de las chimeneas de las antorchas, debido a que estos puntos de descargas son térmicamente flotantes, elevándose por medio de las descargas de estas fuentes. Es importante considerar este fenómeno, ya que las antorchas al tener un comportamiento distinto, tiende a crear una pluma de productos de combustión, la cual aumenta con la velocidad de los gases que serán quemados y la flotabilidad térmica generada por la oxidación residual de los gases. Además, la pluma se ve afecta por la pérdida de calor por radiación del gas residual que se quema. Por lo tanto, para obtener una pluma representativa se requiere considerar la altura de liberación efectiva y el diámetro efectivo en el modelo utilizado. En la figura 33 se observa visualmente el diámetro y altura efectiva de las antorchas.

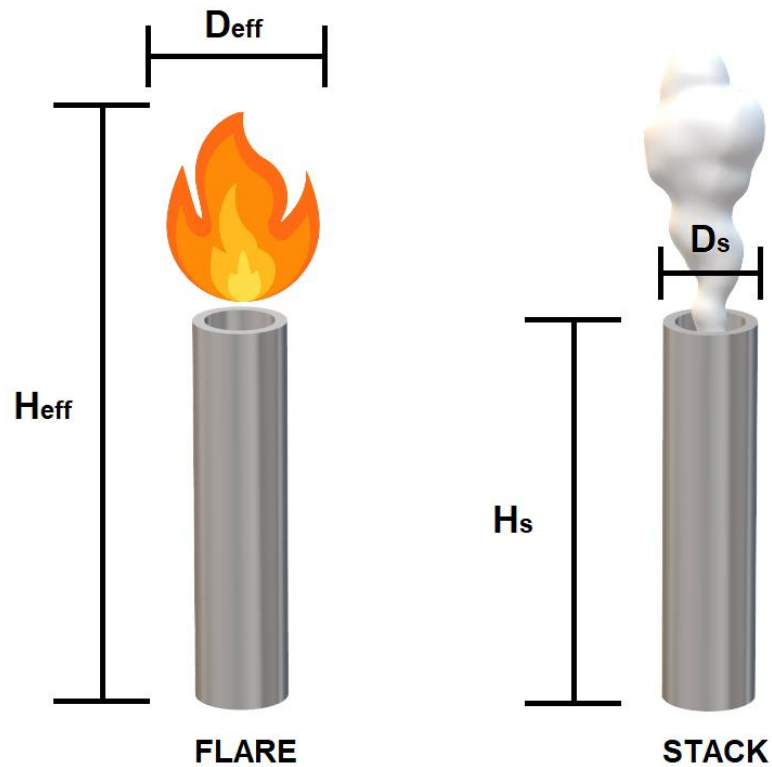


Figura 74 Esquema del diámetro y altura efectiva de las antorchas

Fuente: wkc.cl

12.5.1 Altura efectiva

La altura de liberación efectiva de la pluma se calcula mediante la siguiente formula:

$$H_{eff} = H_s + 4,56 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{(1-f) \cdot H_r}{4,1868} \right)^{0,478}$$

Donde se tiene que:

H_{eff} : Altura de liberación efectiva (m)

H_s : Altura de la chimenea sobre el suelo (m)

H_r : Tasa total de liberación de calor (MJ/s)

f: Factor de pérdida por radiación (%)

Para determinar el valor de la tasa total de liberación de calor (H_r), se utilizó la siguiente expresión:

$$H_r = \text{Poder calorífico} \cdot \text{Flujo}$$

La tabla 22 detalla los tags empleados para el cálculo de la tasa total de liberación de calor para las distintas fuentes.

Tabla 22 Tags poder calorífico y flujo de antorchas

Fuente	Ítem	Tag	Unidad
A-100	Poder calorífico	AI_870A.PV	BTU/scf
	Flujo	FI_890A.PV	m ³ /h
A-200	Poder calorífico	AI_880A.PV	BTU/scf
	Flujo	FI_891A.PV	m ³ /h
L-3741 (Coker)	Flujo calorífico	AI_37400A.PV	BTU/scf
	Flujo	FI_37400B.PV	m ³ /h

Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que el factor de pérdida de calor por radiación se despreció para efectos del cálculo, debido a que se estima que la mayoría de los gases tienen valores cercanos al 20%, lo cual es despreciable en el resultado final.

12.5.2 Diámetro efectivo

El diámetro efectivo de la antorcha se calcula mediante la siguiente expresión:

$$D_{eff} = 2 \cdot \left(\frac{F \cdot T_s}{g \cdot v_s \cdot (T_s - T_{amb})} \right)^{0,5}$$

Donde se tiene que:

D_{eff} : Diámetro efectivo (m)

T_s : Temperatura de salida de los gases (K)

T_{amb} : Temperatura ambiente (K)

g : fuerza de gravedad (9,81 m/s²)

F : Flujo de flotabilidad (m⁴/s³)

12.5.3 Flujo de flotabilidad

El flujo de flotabilidad, es decir, el empuje o fuerza ascendente ejercida por un fluido que se opone al peso de un objeto sumergido parcial o totalmente se calculó con la siguiente ecuación:

$$F = \frac{g \cdot H_r}{\pi \cdot \rho_{aire} \cdot T_{amb} \cdot C_{aire}}$$

Donde se tiene que:

ρ_{aire} : Densidad del aire (1,2 kg/m³)

C_{aire} : Calor específico del aire seco a temperatura ambiente (1004 J/kg·K)

13. Conclusión

En conclusión, en este trabajo se realizó una modelación de dispersión de dióxido de azufre para ENAP Refinería Aconcagua con un error porcentual que varía entre el 30 y 50% en comparación con los datos de inmisiones de las estaciones de calidad del aire.

Para esto se realizó una recopilación exhaustiva de las fuentes de emisión de SO_2 y sus características, tanto de dimensión y emisión. Corrigiendo las fuentes que tenían sus dimensiones desactualizadas y estimando las emisiones de dióxido de azufre, por medio de la composición de azufre en el Fuel Gas de ingreso. Estas estimaciones se ingresaron a PI System y al sistema Airviro con el fin de ser utilizadas como línea de base para las simulaciones.

Por otro lado, se corroboró el estado de los sistemas de monitoreo, en especial de la estación meteorológica a la cual se le aplicó una mantención que involucro limpieza de sus equipos, cambio de los ventiladores de los sensores de temperatura que se encuentran a distintas alturas, revisión del estado general de la torre, escaleras, soportes y plataformas de trabajo y verificación de los datos registrados en datalogger y el patrón de contrastación de temperatura a distinto nivel de altura.

Una vez se incorporaron las fuentes de emisión al sistema Airviro y PI se determinó que el modelo de dispersión de contaminantes que mejor se adapta a las condiciones de la Refinería es Calpuff, debido a que, al comparar con las inmisiones captadas por las estaciones de calidad del aire, se obtuvo un error porcentual que varía entre un 30 y 50 %, en comparación con otros modelos como Aermód o de pluma Gaussiana que presentan errores cercanos al 90%. Lo que se corrobora con la información teórica, ya que Calpuff considera la variación espacial del viento, condiciones de estabilidad atmosférica, fluctuaciones de terreno y es idóneo para zonas costeras.

De igual modo, se realizó un listado de sugerencias para mejorar la calidad de la modelación, tales como la incorporación de un pronóstico de calidad del aire para apoyar la toma de decisiones operacionales, pagar un pronóstico meteorológico de mayor calidad y resolución, verificar las condiciones en las que se encuentra la estación meteorológica y sus sensores, mejorar el monitoreo de las antorchas, uso de algoritmos de aprendizaje estilo 'Machine Learning' y aplicar correcciones en la alturas y diámetros efectivos de las antorchas (Flare).

Por último, se tiene que este trabajo brinda una primera herramienta para el apoyo a la toma de decisiones operacionales de la empresa, teniendo un error mucho menor que el modelo de pluma Gaussiana con el que actualmente se cuenta en la sala de control de la empresa, el cual tiene errores cercanos al 90%. Por lo que se esté tiene un alto potencial para ser mejorado y validado, con el propósito de ser una herramienta que permita ayudar al cumplimiento a legislación ambiental vigente y/o para determinar las fuentes de emisión cuando ocurren episodios de contaminación, permitiendo aplicar medidas correctivas o excusarse en caso de que la fuente no provenga de la Refinería. Además, este modelo permite simular, según fuentes específicas o agrupar por categorías, modelar a distintas alturas y observar el efecto que tiene la composición de azufre en el Fuel Gas de ingreso sobre la calidad del aire.

14. Referencias

1. Vidal-Daza, O. A. (2017, 8 septiembre). *"Estimación de la dispersión de contaminantes atmosféricos emitidos por una industria papelera mediante el modelo AERMOD."* ("Estimación de la Dispersión de Contaminantes Atmosféricos ... - Redalyc") Scielo. Recuperado 14 de junio de 2022, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-750X2018000100031
2. Pérez, J., I. (2016, febrero). Modelo de Dispersión Axial para Sistemas de Flujo Continúo Ajustado a las Condiciones de Borde. Scielo. Recuperado 14 de junio de 2022, de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642016000100018
3. Fire, R. (s. f.). 2.4.1 Estabilidad atmosférica - Risk_Fire. google sites. Recuperado 6 de junio de 2022, de <https://sites.google.com/site/riskfire2010/Home/capitulo-2-antecedentes/2-4-flamazo/2-4-1-estabilidad-atmosferica>
4. Lutgens, F.K. & Tarbuck, E.J. 2010. The Atmosphere: An Introduction to Meteorology. Pearson Prentice Hall
5. Aguado, E. & Burt, J.E. 2010. Understanding Weather & Climate. Pearson Prentice Hall.
6. Barry, R.G., Chorley, R.J. 1999. Atmósfera, tiempo y clima. Omega. Barcelona.
7. Font Tullot, I. 1956. El tiempo atmosférico en las Islas Canarias. Servicio Meteorológico Nacional. Madrid.
8. Nociones de meteorología. (s. f.). euskadi. Recuperado 16 de junio de 2022, de https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/com_perfil_vertical/es_7759/es_perfil.html
9. Takle, E. (1998). 1-7: Deposition Acida. Meteor. Recuperado 2 de junio de 2022, de https://meteor.geol.iastate.edu/gccourse/acid/acid_lecture_es.html
10. A. (2021, 5 marzo). Flare Effective Height & Diameter Calculator. WKC Group. Recuperado 13 de abril de 2022, de <https://www-wkcgroup-com.translate.goog/tools-room/flare-effective-height-diameter-calculator/? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es& x tr pto=wapp>

11. Pérez., A. M. R. (2022, 19 marzo). La OMS acaba de recomendar estándares de calidad del aire más estrictos: ¿qué significa esto y por qué es. Territorios Sostenibles. Recuperado 7 de junio de 2022, de <https://territoriossostenibles.com/calidad-del-aire/la-oms-acaba-de-recomendar-estandares-de-calidad-del-aire-mas-estrictos-que-significa-esto-y-por-que-es-importante>
12. Ambiente, M. D. M. (2019, 16 mayo). Decreto 104 (16-may-2019) M. del Medio Ambiente | Ley Chile. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. www.bcn.cl/leychile. Recuperado 22 de abril de 2022, de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1131641>
13. El dióxido de azufre SO₂. (2020, 24 abril). Instituto para la Salud Geoambiental. Recuperado 1 de marzo de 2022, de <https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-azufre-so2>
14. Chemical Education Material Study, ed. (1987). «Cálculos químicos». Química: una ciencia experimental. Reverté. pp. 237-245.
15. Dióxido de azufre. (s. f.). Ministerio de Medioambiente. Recuperado 24 de abril de 2022, de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/dioxido-azufre.aspx>
16. Norma Primaria de Calidad del Aire de Dióxido de Azufre es aprobada por la Contraloría General de la República. (2019, 13 mayo). mma.gob.cl. Recuperado 15 de junio de 2022, de <https://mma.gob.cl/norma-primaria-de-calidad-del-aire-de-dioxido-de-azufre-es-aprobada-por-la-contraloria-general-de-la-republica/>
17. Machine Learning. (s. f.). ibm.com. Recuperado 4 de julio de 2022, de <https://www.ibm.com/cl-es/analytics/machine-learning>
18. Flare monitors. (s. f.). Zeeco. Recuperado 2 de junio de 2022, de https://es-zeeco-com.translate.goog/products/combustion-electronics/flare-monitors?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=wapp
19. Quintero, Concón y Puchuncaví en emergencia ambiental por nuevo peak de contaminación de SO₂. (s. f.). Reporte Minero | El portal de minería en Chile. Recuperado 4 de mayo de 2022, de <https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2022/06/quintero-concon-puchuncavi-emergencia-ambiental-peak-contaminacion-so2>
20. Estabilidad atmosférica - Risk_Fire. (s. f.). Risk Fire. Recuperado 15 de marzo de 2022, de

<https://sites.google.com/site/riskfire2010/Home/capitulo-2-antecedentes/2-4-flamazo/2-4-1-estabilidad-atmosferica>

21. OpenWeatherMap.org. (s. f.). Weather forecast - OpenWeatherMap. Openweather. <https://openweathermap.org/city/3893865>
22. Jorge, C. (2012). Aplicación de un modelo de dispersión atmosférica [Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil Químico, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso].
23. Soraya, R. (2013). Modelación de la dispersión de las emisiones de SO₂ y NO_x de las termoeléctricas de la ciudad de Quito en el Software Callpuff [Tesis para optar al grado de Máster (MSc) en Ingeniería Ambiental, Escuela Politécnica Nacional]
24. Arnaldo, C. (2011). Análisis de la contaminación transfronteriza y local de contaminantes gaseosos precursores de la deposición ácida húmeda y formación de ozono en Cuba [Tesis para optar al grado de Magíster en: Gestión y planificación ambiental, Universidad de Chile]
25. Evelyn, V. (2018). Análisis integral de los sistemas de aminas en ENAP Refinería Aconcagua [Memoria de titulación para optar al título de Ingeniero Civil Químico, Universidad Técnica Federico Santa María]
26. Felipe, C. (2016). Análisis técnico económico para la mejora de integración energética en circuito de fondo de fraccionadora E-701 en ENAP Refinería Aconcagua [Memoria de titulación para optar al título de Ingeniero Civil Químico, Universidad Técnica Federico Santa María]
27. Javier, S. (2016). Elaboración de un modelo para predecir la operación del convertidor de la planta de ácido sulfúrico [Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Químico, Universidad Técnica Federico Santa María]
28. Viviana, P. (2018). Modelación de la dispersión de compuestos orgánicos volátiles (COV's) generados en un proceso de compostaje de residuos sólidos urbanos [Tesis de grado para optar por el título de magister en ingeniería ambiental, Universidad de Los Andes]
29. Gobierno Vasco (2012). Guía de buenas prácticas para la elaboración de modelos de dispersión
30. U.S. Environmental Protection Agency (1995). Guía del usuario para el modelo de dispersión de complejo de fuente industrial (ISC3)
31. Diario Oficial de la República de Chile (2018). Ministerio del Medioambiente establece norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre SO₂

32.Hoja de datos de seguridad (2015). Dióxido de azufre, Quimetal