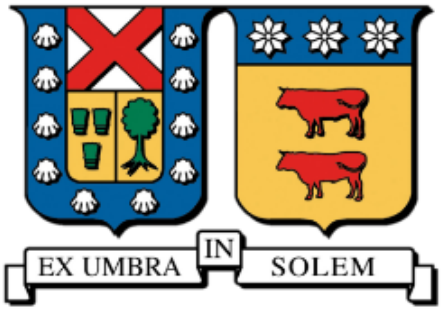
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
SANTIAGO - CHILE



ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICO PARA IMPLEMENTACIÓN DE TORRE DE CAPTACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PARA PLAN DE COMPENSACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS DEL MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL QUÍMICO

ENZO ADOLFO JOSÉ RÍOS CARVAJAL

PROFESOR GUÍA:
DR. HENRIK KIRSTEIN HANSEN

PROFESOR CORREFERENTE:
DRA PAULA GUERRA PINTO

PROFESORES AUXILIARES:
DR. LUIS DIAZ ROBLES
FIDEL VALLEJOS GALLARDO

SANTIAGO DE CHILE
DICIEMBRE 2021

Agradecimientos

Primero agradecer a las personas a distancia que me inspiraron y guiaron con mucho de su sabiduría a través de estos últimos años: Dr Jordan Peterson, Rollo Tomassi, Rich Cooper, David Goggins, Maximilian Berger, Eckhart Tolle, Mat Fraser, entre otros más.

A personas que no están entre nosotros pero su imaginación y formas de ver la vida siguen presentes: Marco Aurelio, Séneca, Epicteto, George Orwell, Ray Bradbury, Julio Verne, etc.

A mis héroes de la infancia, que si bien son ficticios, fueron durante muchos años mis ídolos: Indiana Jones, Tyler Durden, Luke Skywalker y Star-Lord.

A mis amigos de la manósfera, amigos de voluntariados y congresos, mis amigos de la infancia, del colegio, universidad y de muchos años de mi vida que hasta el día de hoy tengo la fortuna de recordarlos y seguir compartiendo con muchos de ellos.

A personas que sin tener el deber de hacerlo, me ayudaron en momentos difíciles a lo largo de mi vida, sea moralmente o económicamente, dándome un segundo aliento.

A los chicos del estudio Roosegaarde que me ayudaron en lo que pudieron con la comprensión del equipo y con información no tan pública, a la universidad de Tenessee, Knoxville por facilitarme sus supercomputadoras, al equipo de ENS por aclararme constantmente dudas y guiarme un poco en el desarrollo del trabajo y finalmente a Roberto Delgado López del área de Calidad del Aire y Cambio Climático del Seremi del Medio Ambiente RM.

A los profesores Luis Diaz y Fidel Vallejos que sin ellos no hubiera podido desarrollar la parte más dificil de éste trabajo, me ayudaron cuando tampoco tenían la obligación de hacerlo.

A mis hermanos: Gina con su gran ingenio, estilo único y ambición y Leonardo por su consejo, por acompañarme en tantas aventuras y por esas noches de comida y Mario Bros.

Finalmente a mi papá: Felipe Ríos, que a pesar de tantos años de pelea y relación a veces tensa o lejana me enseñó varias cosas: la curiosidad por la ciencia y lo desconocido, el amor a los libros y el mundo de la filosofía, el arte de ser autosuficiente y resiliente, y por último, a estar siempre presente y peleando para sacar la familia adelante, enseñándome que mientras sigas respirando, siempre hay una oportunidad.

A todas esas personas que a pesar del miedo y de no sentirse suficientes, se atreven, logrando cambiar la realidad...logrando inspirar a los demás...

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO
POR: ENZO ADOLFO JOSÉ RÍOS CARVAJAL
FECHA: DICIEMBRE 2021
PROF. GUÍA: DR. HENRIK KIRSTEIN HANSEN

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICO PARA IMPLEMENTACIÓN DE TORRE DE CAPTACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PARA PLAN DE COMPENSACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS DEL MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE.

El presente trabajo tiene como finalidad evaluar la prefactibilidad técnica económica de un proyecto de adquisición, instalación y operación de un equipo de captación de material particulado para un área pública de la comuna de Independencia, en la Región Metropolitana de Santiago, con la finalidad de ofrecer un mecanismo de compensación de emisiones medioambientales al Ministerio del Medioambiente que logre disminuir localmente los niveles de concentraciones de material particulado tanto fino como grueso y a los cuales los pobladores del sector están continuamente expuestos, para así buscar aliviar el impacto en la salud de los habitantes.

Primeramente se presenta el planteamiento del problema, exponiendo como Santiago convive con éste fenómeno y seguido de lo anterior se presenta el estado del arte, detallando las actuales políticas, normas, estrategias y medidas a nivel país sobre cómo se está actualmente tratando la problemática de la contaminación atmosférica, además de exponer brevemente otros equipos y tecnologías que se están implementando internacionalmente para buscar solucionar el problema. Se presentan brevemente los contaminantes partícipes de este tipo de contaminación y se detalla el material particulado junto con su composición, perfil físicoquímico y las consecuencias para la salud. Se muestra el historial local y nacional en cuanto al comportamiento del material particulado, las fuentes típicas de emisión de éste, algunos factores meteorológicos y topográficos importantes que contribuyen a la acumulación del contaminante en Santiago tales como su geografía tipo cuenca y el fenómeno de inversión térmica, para luego finalizar con una estadística de la mortalidad, morbilidad y pérdidas económicas y una metodología utilizada para análisis de efectos de cambios de contaminación en la población, que son las llamadas funciones dosis-respuesta.

Prosiguiendo, se presenta el detalle del proyecto. Se detallan las especificaciones técnicas del equipo escogido y luego se procede a escoger la ubicación geográfica urbana en la cual se implementará, utilizando una metodología de jerarquía multicriterio recomendada por la guía de análisis y gestión de impacto ambiental del Ministerio del Medioambiente, la cual entrega la comuna de Independencia como resultado de comuna mayormente crítica. El período de análisis de uso del equipo corresponde a un mes, siendo éste el mes de Agosto del año 2019. El capítulo concluye con un breve análisis FODA del proyecto.

Posteriormente, se expone la metodología para evaluar cuantitativamente el impacto del proyecto. Haciendo uso del programa WRF y CALPUFF de modelación de dispersión de contaminantes se aplica una modelación predictiva mensual del comportamiento del material particulado en la zona a implementar el equipo, considerando una frecuencia de registro de 1 hora. De lo anterior se obtuvo un perfil de concentración de material particulado, los cuales

fueron evaluados en las funciones dosis-respuesta, presentando una posible disminución de en distintos eventos de morbilidad debido a una variación y disminución de los niveles de material particulado en la zona considerando el cambio entre los niveles de concentración entregados por la modelación y los niveles finales que se pueden lograr en el área con el equipo en funcionamiento. Con el equipo se consideró con una eficiencia de captura de un 71 % para material particulado grueso y un 50 % de eficiencia de captura para material particulado fino. Se obtiene una totalidad estimada de 19,3 casos probablemente evitados por disminución de concentración de material particulado grueso y 7,2 casos probablemente evitados por una disminución de material particulado fino. También se obtiene una proyección anual dentro de ese mismo año de 726,9 casos probablemente evitados por disminución de material particulado grueso y 138,2 casos probablemente evitados por disminución de material particulado fino.

En términos netos, se obtiene además un volumen de captura para el período mensual modelado de 0,085 [ton/mes] de material particulado fino y 0,092 [ton/mes] de material particulado grueso, y una proyección anual de captura de 44,25 [ton/año] de material particulado grueso y 76,37 [ton/año] de material particulado fino.

Continuando, se presenta el costo estimado de la implementación del equipo, entregando un costo final de aproximadamente 76.010 [USD]. Junto con ésto, se traduce la disminución de los eventos de morbilidad anteriormente obtenidos a beneficios monetarios. Para las distintas afecciones consideradas se otorgan valores monetarios a cada evento de morbilidad según la guía AGIES del Ministerio del Medio ambiente y de otros estudios epidemiológicos. El beneficio monetario, es calculado para ambas variaciones de concentraciones de material particulado, obteniendo un beneficio social neto de 2.837.798 [USD] para la mitigación enfocada al MP10 con probabilidad media y de 2.194.289 [USD] para la mitigación enfocada al MP2.5 con probabilidad media, ambas para el período mensual analizado. Junto con lo anterior, se obtienen métricas mensuales y proyecciones anuales para poder evaluar mejor el proyecto, siendo la de Costo-efectividad: 8,92 [USD costo/(ug/m^3)] y la de Razón costo-beneficio 0,086 [USD beneficio/USD costo], ambas como métricas mensuales y Costo-efectividad: 0,23 [USD costo/(ug/m^3)] y la de Razón costo-beneficio 1,844 [USD beneficio/USD costo] ambas como métricas anuales.

Además de lo anterior, se utiliza análogamente al VAN, el BSN (beneficio social neto), proyectado solamente durante el mismo año del mes modelado y utilizando una tasa social de descuento de un 3 %, entregando un valor de 89.680 [USD].

Finalmente se concluye que la eficacia del cumplimiento de las metas de este proyecto depende del grado de exposición efectiva que el equipo entregue a los individuos del sector, a la mejora en cuanto a las herramientas de modelación, de las funciones dosis respuesta para volverse más complejas y precisas y finalmente a la predisposición que entidades estatales presenten frente al ofrecimiento de éste u otro tipo de tecnologías como mecanismos viables de compensación de emisiones atmosféricas dentro de la Región Metropolitana con un enfoque de beneficio social y mitigación de contaminación atmosférica en sectores públicos, siendo esta implementación del equipo SFT, un proyecto con un gran potencial y que además cumple con muchas de las políticas y lineamientos establecidos por el ministerio del medio ambiente respecto a temas de bienestar social debido a la contaminación atmosférica en la capital de Santiago de Chile.

Abstract

The purpose of this work is to evaluate the technical and economic pre-feasibility of a project for the acquisition, installation and operation of a particulate material collection equipment for a public area of the commune of Independencia in the Metropolitan Region Of Santiago, in order to offer a mechanism to compensate for environmental emissions to the Ministry of the environment that manages to locally reduce the levels of both fine and coarse particulate material of different sources to which the inhabitants of the sector are continuously exposed, in order to seek to alleviate the impact on the health of the inhabitants.

First, the approach to the problem is presented, exposing how Santiago con- lives with this phenomenon and followed by the above the state of the art is presented, detailing the current policies, standards, strategies and measures at the country level on how it is currently being dealing with the problem of air pollution, in addition to briefly exposing other equipment and technologies that are being implemented internationally to seek to solve the problem.The contaminants involved in this type of contamination and detailed particulate matter along with its composition, physical profile- chemical and health consequences. Local and national history is displayed as soon as to the behavior of particulate matter, the typical sources of emission of the latter, some important meteorological and geographical factors that contribute to the accumulation of the pollutant in Santiago such as its basin-like geography and the inversion phenomenon thermal and then end with a statistic of mortality, morbidity and economic losses and a methodology used to analyze the effects of pollution changes in the population, which are the so-called dose-response functions

After the above, the strategy is exposed to quantitatively evaluate the impact of the project, using mathematical tools a monthly predictive modeling of the behavior of the particulate material in the area to be implemented, considering an hourly frequency of obtaining concentrations of particulate material in the selected commune. From the above, a possible decrease in morbidity events was obtained due to a variation and decrease in the levels of particulate material in the area, initially considering the concentration levels delivered by the predictive modeling and the final levels that can be achieved in the area with the equipment in operation, considering a capture efficiency of 71 % of the equipment for coarse particulate matter and a 50 % capture efficiency for fine particulate matter. Dose response functions are used that translate this variation in concentration to these avoided cases of morbidities, considering the following health conditions that are directly related to these changes in the concentration levels of particulate matter: Mortality, cardiovascular and cerebrovascular diseases, hospital admissions, restriction of activity, bronchitis and cough in children and adults and exacerbation and asthma attacks. A total of 19,3 cases avoided by all the conditions considered were obtained due to a decrease in the concentration of coarse particulate material and 7,2 cases avoided due to a decrease in fine particulate material, both analyzed only in the period of August 2019 and with a simple estimation it was obtained an annual projection within that same year of 726,9 cases avoided due to reduction of coarse particulate material and 138.2 cases avoided due to reduction of fine particulate material.

In general terms, a capture volume is also obtained for the modeled monthly period of 0,085 [ton/month] of fine particulate material and 0,092 [ton/month] of coarse particulate material, and an annual capture projection of 44,25 [ton/year] of coarse particulate matter

and 76,37 [tons/year] of fine particulate matter.

Continuing with the study, the estimated cost of implementing the equipment is presented, which according to the company that created it, in conjunction with guidelines for installation values from observations made by the EPA in pollution mitigation equipments, providing a final cost of approximately 76.010 [USD]. After this, the decrease in morbidity events previously obtained is translated into monetary benefits. For the different conditions presented, a cost-benefit analysis approach recommended by the environmental management and impact analysis guide of the Ministry of the Environment is used, giving monetary values to each morbidity event according to that guide. The monetary benefit is calculated for both variations in concentrations of particulate matter, obtaining a net social benefit of 2.837.798 [USD] for mitigation focused on PM10 with medium probability and 2.194.289 [USD] for mitigation focused on PM2.5 with average probability, both for the monthly period analyzed. Along with the above, it was possible to obtain monthly metrics and annual projections to better evaluate the project, being the Cost-effectiveness: 8,92 [USD cost/(ug/m^3)] and the Cost-benefit ratio 0,086 [USD benefit/USD cost], both as monthly metrics and Cost-effectiveness: 0,23 [USD cost /(ug/m^3)] and that of Cost-benefit ratio 1,844 [USD benefit/USD cost] both as annual metrics.

In addition to the above, as a recommendation from the Ministry of the Environment, the BSN (net social benefit) is used analogously to the NPV, projected only during the same year of the modeled month and using a social discount rate of %, delivering a value of 89.680 [USD].

Finally, in the last chapter, it is established and concluded that the effectiveness of the fulfillment of the goals of this project depends on the degree of effective exposure that the team provides to the individuals in the sector, to the improvement in terms of modeling tools and dose response functions to become more complex and precise and finally to the predisposition that state entities present in the face of the offer of this or other types of technologies as viable mechanisms of compensation of atmospheric emissions within the Metropolitan Region with a focus on social benefit and mitigation of air pollution in public sectors, being this implementation of the SFT equipment, a project with a great projection that also complies with many of the policies and guidelines established by the Ministry of the Environment regarding social welfare issues due to air pollution in the capital of Santiago de Chile.

Glosario

- ACB: Análisis Costo-Beneficio.
- ACS: Sociedad Americana del Cáncer, del inglés "American Cancer Society".
- AGIES: Análisis General de Impacto Económico y Social.
- AHP: Proceso analítico de Jerarquía, del inglés "Analitycal Hierarchy Process".
- CFD: Fluido Dinámica Computacional, del inglés "Computational Fluid Dynamics".
- CI: Coeficiente Intelectual.
- CMM: Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile.
- CNE: Comisión Nacional de Energía.
- CO: Simbología química para el monóxido de carbono.
- CONAMA: Comisión Nacional del Medio Ambiente.
- COV: Abreviación para Compuesto Orgánico Volátil.
- DEIS: Departamento de Estadística e Información de la Salud.
- DIA: Declaración de Impacto Ambiental.
- EIA: Estudio de Impacto Ambiental.
- EMRP: Estación de Monitoreo de material particulado con Representatividad Poblacional.
- ENS: Instituto Tecnológico Holandés "Environmental nano solutions".
- EPA: Agencia de protección ambiental, del inglés "Environmental Protection Agency".
- EPOC: Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica.
- ERA: Enfermedades Respiratorias del Adulto.
- ERVAI: Enfermedades Respiratorias por Vía Aérea Interior.
- ESI: Índice de Sustentabilidad Ambiental, del inglés "environmental sustainability index".
- FDR: Funciones Dosis-Respuesta.
- GCA: Guía de Calidad del Aire.
- GEASUR: Grupo de Estudio Ambiental del Sur.
- GEC: Gestión de Episodios Críticos de Contaminación.
- IDH: Índice de Desarrollo Humano.
- IRA: Infecciones Respiratorias Agudas.
- km^2: Kilómetros cuadrados.
- m^3: Metros cúbicos.

- m^3N: Metros cúbicos normales.
- MACAM: Red de Monitoreo Automático de Calidad del Aire.
- MINSAL: Ministerio de Salud.
- MMA: Ministerio del Medio Ambiente.
- MP: Material Particulado.
- MTT: Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones.
- NCAR: Centro Nacional para la Investigación Atmosférica, Estados Unidos.
- NCEP: Administración Nacional Oceánica y Atmosférica.
- NCEP: Centro nacional de predicción ambiental, del inglés "National Center for Environmental Prediction".
- NOAA: Administración Nacional Oceánica y Atmosférica del inglés "National Oceanic and Atmospheric Administration".
- NO_x: Simbología química para óxidos de nitrógeno.
- NRL: Laboratorio de Investigación Naval.
- O_3: Simbología química para el Ozono.
- OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.
- OMS: Organización Mundial de la Salud.
- OPS: Organización Panamericana de la Salud.
- Pb: Simbología química para el Plomo.
- PCE: Programa Compensación de Emisiones.
- PDARM: Plan de Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana.
- PPDA: Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica.
- PTS: Particulas totales en suspensión.
- RCA: Resolución de Calificación Ambiental.
- REMA: Reporte del Estado del Medio Ambiente.
- RET-C: Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes.
- RM: Región Metropolitana de Santiago de Chile.
- SBO: Síndrome Bronquial Obstructivo.
- SEA: Servicio de Evaluación Ambiental.
- SECTRA: Programa de Vialidad y Transporte Urbano, Ministerio de transporte y telecomunicaciones.
- SEIA: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.
- SEREMI: Secretaría Regional Ministerial.
- SFT: Torre de captación de smog del inglés "Smog Free Tower".
- SINCA: Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire.
- SITAS: Sistema de Información Territorial de la Autoridad Sanitaria.
- SMA: Superintendencia del Medio Ambiente.
- SO_2: Simbología química para el dióxido de azufre.
- TMA: Tasa de Mortalidad Ajustada.
- TMC: Tasa de Mortalidad Cruda.

- USEPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.
- W: Watts.
- WPS: Sistema de preprocesado de WRF del inglés "WRF preprocesing system".
- WRF: Programa de investigación climática y modelos previsivos, del inglés "Weather Research and Forecasting Model".
- µg: Micrógramos.
- µm: Micrómetros.

Tabla de Contenido

1. Introducción **1**

2. Objetivos **3**
2.1. Objetivos del Proyecto . . . 3
2.1.1. General . . . 3
2.1.2. Específicos . . . 3
2.2. Metodología . . . 4
2.3. Estado del arte . . . 6
2.3.1. Antecedentes, normas y estrategias para la reducción y control de contaminación atmosférica. . . . 6
2.3.2. Plan de acción actual del gobierno de Chile: SEIA y el PPDA. . . . 12
2.3.3. Enfoque tecnológico para tratamiento directo de la contaminación atmosférica: ¿Qué se está haciendo en Chile y el mundo? . . . 14
2.3.4. Tecnologías internacionales . . . 16

3. Fenómeno de contaminación atmosférica por material particulado **23**
3.1. Contexto global . . . 23
3.1.1. Estado y calidad de aire en ciudades altamente pobladas . . . 23

4. Marco teórico referencial **29**
4.1. Contaminante clave: material particulado, procedencia y características. . . . 29
4.2. Contexto local . . . 34
4.2.1. Fuentes de emisión de MP e historial en la Región Metropolitana. . . . 34
4.2.2. Factores climático-geográficos contribuyentes a la formación de contaminación atmosférica en Santiago. . . . 39
4.2.3. Funciones dosis-respuesta y su relación con el material particulado y la salud humana. . . . 49

5. Definición y propuesta de proyecto **52**
5.1. Especificaciones técnicas . . . 54
5.2. Resultados del equipo en otros países . . . 56
5.3. Criterios y especificación del sector geográfico a tratar . . . 58
5.4. Método APH usado para identificar el sector óptimo para implementación de la SFT . . . 64
5.5. Resultado, características medioambientales y demográficas del sector escogido y justificación. . . . 66

5.6. Alcance del proyecto. 72
5.6.1. Alcance geográfico. 72
5.6.2. Alcance temporal. 73
5.6.3. Contaminantes considerados. 73
5.6.4. Fuentes emisoras consideradas en el sector. 74
5.6.5. Alcance Poblacional y receptores afectados. 74
5.6.6. Efectos en la salud considerados. 74
5.6.7. Escenarios de análisis. 74
5.7. Análisis FODA. 75

6. Modelamiento y justificación **78**
6.1. Inventario de emisiones a utilizar 78
6.2. Modelamiento predictivo de concentración de contaminante 79
6.3. Programas de modelamiento utilizados en el estudio 84
6.4. Suposiciones, condiciones y configuración base de la modelación 88

7. Resultados y discusión **91**
7.1. Resultados de modelación 92
7.2. Evaluación en FDR 108

8. Estudio Económico **111**
8.1. Método de cálculo para estimación monetaria de beneficio. 111
8.2. Resultados económicos aplicados en las afecciones estudiadas con FDR . . . 112
8.3. Costo económico de la realización del proyecto 112
8.3.1. Análisis Económico 114

9. Conclusiones y recomendaciones **118**

Bibliografía **120**

Anexos **129**

A. Metodología de atenuación BETA-MET ONE 1020 según el principio de la ley de Beer. **130**

B. Causas más frecuentes de defunciones en adulto mayor y en infantiles menores a 4 años por enfermedades al sistema respiratorio, año 2014. **132**

C. Principales edades de defunciones en población de tercera edad e infantiles menores a 1 año en la región Metropolitana a causa de enfermedades al sisema respiratorio, año 2014. **133**

D. Niveles de concentración de MP10 y MP2.5 en las comunas de La Florida e Independencia en el año 2015 en función de los meses del año. **134**

E. Ficha técnica SFT y pruebas realizada en estadio en China. **139**

F. Noticia de implementación exitosa en China de la SFT. **145**

G. Desarrollo del método APH para la selección de la comuna a instalar el equipo. 147

H. Gráficas de altura de mezcla, temperatura de la zona,velocidad del viento modelada y perfiles de MP entre zona de torre y zona de estación modelada. 160

I. Rosas de los vientos obtenidas mediante RED-MACAM y mediante modelación WRF-CALPUFF. 166

J. Tabla de parámetros para el cálculo monetario de las FDR para cada afección. 168

K. Tablas de niveles de MP10 y MP2.5 a lo largo del año 2019 para la comuna de Independencia. 170

L. Cálculo para captura aproximada de MP mensual y anual. 173

Índice de Tablas

2.1. Rangos de concentración de MP10 establecidos por normas de distintos países alrededor del mundo y organizaciones internacionales, los valores intermedios de la OMS hacen referencia a valores progresivos de reducción en el tiempo [Departamento de Normas y Políticas, 2016]. 11
2.2. Medidas tomadas por el PPDA para el control de niveles de MP en la RM [Departamento de Economía Ambiental, 2013]. 12
2.3. Emisión máxima de proyectos dentro de la Región Metropolitana según el art. 64 del [Decreto 31, 2016]. Fuente: [DFM Consultores Ambientales, 2019]. . . 14

3.1. Compuestos que mayormente participan en la contaminación atmosférica y sus efectos en la salud. Fuente: elaboración propia. 27
3.2. Compuestos que mayormente participan en la contaminación atmosférica y sus efectos en la salud. Fuente: elaboración propia. 28

4.1. Clasificación del tipo de material particulado que compone la contaminación atmosférica a tratar [Ministerio del Medio Ambiente, sf]. 32
4.2. Efectos del MP de dos rangos de tamaño en la salud humana. Fuente: elaboración propia. 33
4.3. Principales causas de morbilidad en pacientes menores a 15 años y mayores a 65 años atendidos en el consultorio Albertz en la comuna de Cerrno Navia, año 2007 Fuente: [Prieto C. et al., 2007]. 44
4.4. Complicaciones de salud y factores específicos que afectan a los grupos poblacionales de infancia y senectud en la provincia de la RM por exposición a MP. Fuente: [Oyarzún G., 2010]. 46
4.5. Estimación teórica de las pérdidas económicas a nivel país producto de la mortalidad y morbilidad causada por enfermedades respiratorias variadas, año 2018. Fuente: [Ministerio del Medio Ambiente, 2019c]. 47

5.1. Promedios históricos de MP10 para distintas comunas de la provincia de la RM asociadas a la red MACAM-RM elaborada con datos obtenidos de SINCA. Fuente: [Ministerio del Medio Ambiente, 2015b]. 60
5.2. Promedios históricos de MP2.5 para distintas comunas de la provincia de la RM asociadas a la red MACAM-RM elaborada con datos obtenidos de SINCA. Fuente: [Ministerio del Medio Ambiente, 2015b]. 60
5.3. Densidad poblacional para sectores de la población con mayor riesgo a enfermedades debido a la contaminación atmosférica, considerando las comunas censadas en el año 2016, Fuente: elaboración propia. 62

5.4. Matriz final de decisión de sector más óptimo a implementar el proyecto según el método de selección APH. Fuente: elaboración propia. 65
5.5. Valores de los factores más críticos a considerar de la comuna de Independencia para la implementación del proyecto. Fuente: elaboración propia. 66
5.6. Valores de los factores más críticos a considerar de la comuna de La Florida para la implementación del proyecto. Fuente: elaboración propia. 69
5.7. Resumen de los alcances considerados en la investigación. 75

6.1. Tipos de modelos recomendados según los estudios epidemiológicos y el SEIA para la estimación de concentraciones de contaminantes atmosféricos para estudios epidemiológicos. Fuente: [Ministerio del Medio Ambiente, 2012]. . . . 80
6.2. Condiciones y configuraciones para el modelamiento utilizado en WRF y CALPUFF®. 88

7.1. Tabla de estadísticas de datos observados y datos predichos por el modelo para la estación de monitoreo de Independencia. $\bar{O}$ corresponde a la media observada (en [ug/m^3]), $\bar{E}$ corresponde a la media del modelo, $\sigma_{\bar{O}}$ y $\sigma_{\bar{E}}$ son las desviaciones estándar, MAE el error medio absoluto, RMSE el error cuadrático medio y r el coeficiente de correlación. 94
7.2. Tabla de porcentaje del total numérico de los datos modelados cada hora y el porcentaje de error de predicción que estos presentan respecto al valor real. . 96
7.3. Percentiles de los valores de MP10 modelados y de la red MACAM, y el factor de corrección alfa. 101
7.4. Percentiles de los valores de MP2.5 modelados y de la red MACAM, y el factor de corrección alfa. 101
7.5. Resumen de sub y sobrediemnsionamientos más significativos que posiblemente afectan los resultados obtenidos en las FDR. 104
7.6. Resultado estimado de casos evitados por variación de MP10 según las FDR seleccionadas. 109
7.7. Resultado estimado de casos evitados por variación de MP2.5 según las FDR seleccionadas. 109

8.1. Tabla de cantidad de casos posibles en la investigación considerando la población del sector y la variación de PM. El costo asociado a padecer esa aflicción, tanto para las provocadas por PM10 como por PM2.5 fueron extraídos de [GreenLab UC, 2012] y de [Sánchez et al., 1998a]. 112
8.2. Costos del proyecto, los valores* corresponden a aproximaciones recomendadas en [Mussatti, 2002]. 113

Índice de Figuras

2.1. Esquema de factores a considerar entre la causa inicio de contaminación atmosférica hasta concluir en la salud de la población expuesta a la contaminación [Departamento de Economía Ambiental, 2013]. 4
2.2. Gráfica del promedio trianual de MP 2.5 en estaciones de monitoreo del país en el año 2018. Fuente: pg. 110 [Ministerio del Medio Ambiente, 2019a]. . . . 7
2.3. Gráfica del promedio trianual de MP 10 en estaciones de monitoreo del país en el año 2018 Fuente: [Ministerio del Medio Ambiente, 2019b]. 8
2.4. Concentración MP10 y 2.5 en la Región Metropolitana en [ug/m3] desde el año 1989 hasta el año 2016, medidas y elaboradas por el Departamento de Redes de Monitoreo [Secretaría Regional Ministerial, 2018]. 13
2.5. Implementación de Techo verde en centro juvenil Gary Corner, Chicago, EEUU [DFM Consultores Ambientales, 2019]. 15
2.6. Implementación de Techo Verde en edificio Amapolas, Ñuñoa, Región Metropolitana, [DFM Consultores Ambientales, 2019]. 16
2.7. Panel de musgos "Citytree" propiedad de la empresa Green City Solutions [Greencity Solutions, 2021]. 17
2.8. Torre purificadora en la ciudad de Xi'an, China [Raya, 2018]. 18
2.9. Estructura de TIO_2 implementada en la fachada del hospital Gea González en México [De Oriente a Occidente, 2013]. 19
2.10. Estructura "Airbol" que fue implementada en la ciudad de Medellín, Colombia [Redacción El Tiempo, 2016]. 19
2.11. Ejemplos de torres de microalgas modelo Biourban 2.0 y Biourban industrias [Villanueva, 2019]. 20
2.12. Prototipo Filtro Vivo Doméstico implementado en la ciudad de Temuco, Chile [Hydrosim, sf]. 21
2.13. Bicicleta "Smog free" puesta a prueba e implementada en la ciudad de Beijing, China [Studio Roosegaarde, 2019]. 21
2.14. Diversos proyectos realizados por la empresa ENS [ENS, sf]. 22

3.1. Mapa de la población mundial expuesta a niveles superiores de material particulado según lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud en el año 2016, la escala corresponde al porcentaje de población del país expuestas a concentraciones que exceden la norma [Brauer, M. et al., 2016]. 24
3.2. Niveles de contaminantes en algunas de las ciudades con mayor densidad poblacional en el mundo. Fuente: [O'Ryan and Larraguibel, 2000]. 25

3.3. Un caso típico de contaminación en ciudad altamente poblada es el ejemplo de contaminación por Ozono troposférico en la ciudad de Madrid, España [El Independiente, 2018], donde los contaminantes primarios (NO_x) reaccionan catalizando la formación de este ozono troposférico. 26

4.1. Distribución de los compuestos químicos contenidos en el MP variando según el diámetro, para zonas urbanizadas. Fuente: [Arciniégas S., 2012]. 29
4.2. Particulas de material particulado observadas mediante microscopía electrónica. Fuente: [Centro de Ciencias Ambientales, sf]. 30
4.3. Caracterización del MP 2.5 en la región metropolitana de Santiago en año 2015. Fuente: [Decreto 31, 2016]. 30
4.4. Caracterización del MP 10 en la zona urbanizada de Chillán, Chile. Fuente: [Celis Hidalgo et al., 2007]. 31
4.5. Distribución general de tamaño de material particulado dependiendo de distintas fuentes. Fuente: [Arciniégas S., 2012]. 32
4.6. Representación ilustrativa del tamaño del MP. Fuente: [Salini C., 2009]. . . . 32
4.7. Niveles históricos de MP 2.5 en la RM a lo largo de las últimas décadas, considerando la ejecución de distintos proyectos por parte del estado para disminuir éstos niveles de MP. Fuente: [Decreto 31, 2016]. 35
4.8. Emisiones de MP 2.5 en el año 2013. Fuente: [Explora, sf]. 36
4.9. Fuentes de emisiones de MP10 en porcentajes, inventario base de 1997, utilizado en decreto actualmente derogado. Fuente: [Decreto 16, 1998]. 36
4.10. Número de días con episodios críticos que superan la norma de MP10, registradas desde el año 1987 hasta el año 2017. Siendo alerta: valores entre 80-109 [$\mu g/m^3$] de MP10 promedio en 24 hrs, pre-emergencia: valores entre 110-169 [$\mu g/m^3$] de MP10 promedio en 24 hrs y emergencia: 170 [$\mu g/m^3$] de MP10 promedo 24 hrs. Fuente: [Secretaría Regional Ministerial, 2018]. 37
4.11. Número de días con episodios críticos que superan la norma de MP2.5, registradas desde el año 1987 hasta el año 2017. Siendo alerta: valores entre 80-109 [$\mu g/m^3$] de MP10 promedio en 24 hrs, pre-emergencia: valores entre 110-169 [$\mu g/m^3$] de MP10 promedio en 24 hrs y emergencia: 170 [$\mu g/m^3$] de MP10 promedo 24 hrs. Fuente: [Secretaría Regional Ministerial, 2018]. 38
4.12. Ilustración del fenómeno de inversión térmica en ciudad de La Plata en agosto de 2018. Fuente: [Salini C., 2009]. 39
4.13. Esquema del frente de alta presión provocada por el anticiclón del pacífico, en parte de la zona centro norte de Chile. Fuente: [Salini C., 2009]. 40
4.14. Mapa topográfico de la cuenca de Santiago con las cadenas montañosas y sus altitudes, los puntos negros corresponden a las estaciones de monitoreo de la ciudad pertenecientes a la red MACAM. Fuente: [Saide P., 2008] 41
4.15. Representación de la influencia que la geografía tipo cuenca ejerce en el estancamiento del smog en la región Metropolitana en épocas de otoño-invierno. Fuente: [Salini C., 2009]. 42
4.16. Niveles de concentración de MP10 en la provincia de la RM en el año 2015 en función de los meses del año. Fuente: [Decreto 31, 2016]. 42

4.17. Gráfica de % de consultas en niños menores a 15 años atendidas por las clínicas y referidas a las enfermedades tipo SBO, respecto al total de consultas por morbilidad. CA corresponde a Clinica Albertz y RM corresponde a las clinicas del resto de la provincia de la RM. Fuente: [Prieto C. et al., 2007]. 44
4.18. Gráfica de % de consultas en niños menores a 15 años atendidas por las clínicas y referidas a las enfermedades tipo neumonía, respecto al total de consultas por morbilidad, CA: Clinica Albertz, RM: El resto de las clínicas en la provincia de la RM. Fuente: [Prieto C. et al., 2007]. 45
4.19. Gráfica de % de consultas en adultos mayores a 65 años atendidas por las clínicas y referidas a las enfermedades tipo ERVAI, respecto al total de consultas por morbilidad, CA: Clinica Albertz, RM: El resto de las clínicas en la provincia de la RM. Fuente: [Prieto C. et al., 2007]. 45
4.20. Esquema de factores a considerar entre la causa inicio de contaminación atmosférica hasta concluir en la salud de la población expuesta a la contaminación [Departamento de Economía Ambiental, 2013]. 47

5.1. Esquema de los resultados de encuesta realizada a la población nacional sobre los principales problemas medioambientales que se deberían solucionar [Ministerio del Medio Ambiente, 2018]. 53
5.2. Equipo "Smog Free Tower" implementado en la ciudad de Rotterdam en 2015. Fuente: [Studio Roosegaarde, 2015]. 54
5.3. Equipo "Smog Free Tower" implementado en parque de Kraków, Polonia. Fuente: [Blackburn, 2018]. 55
5.4. Equipo "Smog Free Tower" construido e implementado en Beijing, China. Fuente: [India - ICT, sf]. 55
5.5. Joya creada utilizando el smog recolectado de 1.000 [m^3] de aire tratado; el anillo, llamado "smog free ring", es usado por la empresa para seguir promoviendo la tecnología y el crowdfunding. Fuente: [Studio Roosegaarde, 2015]. 56
5.6. Representación 3D de la implementación de la SFT por la empresa Roosegaarde Studios realizada en el estadio Minyuan en la ciduad de Tianjin, China. . 57
5.7. Fenomenología de la atracción de partículas suspendidas mediante Ionización. Fuente: [ENS, 2017]. 58
5.8. Simplificación de lo que se espera que la torre logre al aplicarse en el área respecto a los niveles de MP. Fuente: elaboración propia. 58
5.9. Plataforma online SINCA. Fuente: [Ministerio del Medio Ambiente, 2015b]. . 59
5.10. Población menor a 4 años en la provincia de la RM especificada por comunas, datos obtenidos de Censo 2017. Fuente: elaboración propia. 61
5.11. Población mayor a 60 años en la provincia de la RM especificada por comunas, datos obtenidos de Censo 2017. Fuente: elaboración propia. 61
5.12. Esquema de objetivo, criterios y subcriterios del análisis APH. Fuente: elaboración propia. 64
5.13. Mapa de la comuna de Independencia con los principales establecimientos y áreas verdes a considerar para la implementación del equipo. Fuente: Elaboración propia a base de [SIIT, 2017a]. 68
5.14. Mapa del sector norte de la comuna de La Florida con los principales establecimientos y áreas verdes a considerar para la implementación del equipo. Fuente: elaboración propia a base de [SIIT, 2017b]. 70

5.15. Mapa del sector sur de la comuna de La Florida con los principales establecimientos y áreas verdes a considerar para la implementación del equipo. Fuente: elaboración propia a base de [SIIT, 2017b]. 71
5.16. Mapa del sector escogido dentro de la comuna de Independencia, Fuente: elaboración propia. 73

6.1. Mapa de la ubicación de la estación de monitoreo de la comuna de Independencia y la ubicación geográfica anteriormente detallada de la torre. Fuente: elaboración propia. 82
6.2. Ubicaciones de cerros cercanos a la estación de monitoreo y a la localización del equipo. Fuente: elaboración propia. 83
6.3. Ubicación geográfica de la localización de la torre y su distancia con las Autopistas Central y Costanera Norte. Fuente: elaboración propia. 84
6.4. Modelamiento entregado por WRF sobre el comportamiento y concentración de las partículas del desierto del Sahara sobre Europa en el año 2018. Fuente: [Baumann-Stanzer et al., 2019]. 85
6.5. Esquema de pasos para operación de WRF. Fuente: elaboración propia. . . . 86
6.6. Interfaz de CALPUFF para el análisis de una fuente fija y vehicular de emisión MP en la ciudad de Nueva York. Fuente: [Weblakes Software, 2021]. 87
6.7. Fuentes de emisión de MP consideradas e ingresadas a CALPUFF®. Fuente: elaboración propia. 89
6.8. Zona modelada en CALPUFF® considerando las fuentes de emisión de MP y puntos discretos que recolectarán la data de niveles de MP y condiciones meteorológicas terminada la modelación. Fuente: elaboración propia. 90

7.1. Niveles de MP10 entregados por SINCA y modelados por WRF® y CALPUFF® durante el mes de agosto, con los respectivos niveles recomendados por la normativa nacional. Fuente: elaboración propia. 92
7.2. Niveles de MP2.5 entregados por SINCA y modelados por WRF® y CALPUFF® durante el mes de agosto, con los respectivos niveles recomendados por la normativa nacional. Fuente: elaboración propia. 92
7.3. Niveles de MP10 entregados por SINCA y modelados por WRF® y CALPUFF® durante el mes de agosto, agrupados en promedios diarios con sus respectivos intervalos de confianza. Fuente: elaboración propia. 93
7.4. Niveles de MP10 entregados por SINCA y modelados por WRF® y CALPUFF® durante el mes de agosto, agrupados en promedios diarios con su respectivos intervalos de confianza. Fuente: elaboración propia. 93
7.5. Gráfica de temperatura obtenida en el punto de torre por modelación. Fuente: elaboración propia. 95
7.6. Gráfica de velocidad de viento obtenida en el punto de torre por modelación. Fuente: elaboración propia. 95
7.7. Gráfica de altura de mezcla obtenida en el punto de torre por modelación. Fuente: elaboración propia. 96
7.8. Niveles de MP10 modelados durante el mes de agosto, para la zona de la torre. Fuente: elaboración propia. 97
7.9. Niveles de MP2.5 modelados durante el mes de agosto, para la zona de la torre. Fuente: elaboración propia. 98

7.10. Niveles de MP10 entregados por SINCA y modelados por WRF® y CALPUFF® durante el mes de agosto, agrupados en promedios diarios. Fuente: elaboración propia. 98
7.11. Niveles de MP2.5 entregados por SINCA y modelados por WRF® y CALPUFF® durante el mes de agosto, agrupados en promedios diarios. Fuente: elaboración propia. 99
7.12. Perfil de variación de concentración de MP10 entre la estación de monitoreo (punto discreto 2) y la zona de la ubicación de la torre (punto discreto 1) para el dia 31/07/2020 a las 23:00 [pm]. Fuente: elaboración propia. 99
7.13. Perfil de variación de concentración de MP2.5 entre la estación de monitoreo (punto discreto 2) y la zona de la ubicación de la torre (punto discreto 1), para el dia 31/07/2020 a las 23:00 [pm]. Fuente: elaboración propia. 100
7.14. Metodología para obtención de datos más ajustados a la realidad. 101
7.15. Valores de red MACAM para MP10 y valores de MP10 de modelamiento corregido. 102
7.16. Valores de red MACAM para MP10 y valores de MP10 de modelamiento corregido. 102
7.17. Valores de MP10 del modelado inicial y valores de MP10 de modelamiento corregido para la zona de la torre. 103
7.18. Valores de MP2.5 del modelado inicial y valores de MP2.5 de modelamiento corregido para la zona de la torre. 103
7.19. Dominio de la zona modelada. El perfil de la concentración de MP10 (también llamada "pluma") corresponde al día 01/08/2020 a las 8:00 am. Fuente: elaboración propia. 105
7.20. Dominio de la zona modelada. El perfil de la concentración de MP10 (también llamada "pluma") corresponde al día 08/08/2020 a las 17:00 pm. Fuente: elaboración propia. 105
7.21. Dominio de la zona modelada. El perfil de la concentración de MP10 (también llamada "pluma") corresponde al día 21/08/2020 a las 0:00 horas. Fuente: elaboración propia. 106
7.22. Dominio de la zona modelada. El perfil de la concentración de MP2.5 (también llamada "pluma") corresponde al día 01/08/2020 a las 8:00 am. Fuente: elaboración propia. 106
7.23. Dominio de la zona modelada. El perfil de la concentración de MP2.5 (también llamada "pluma") corresponde al día 08/08/2020 a las 17:00 pm. Fuente: elaboración propia. 107
7.24. Dominio de la zona modelada. El perfil de la concentración de MP2.5 (también llamada "pluma") corresponde al día 21/08/2020 a las 0:00 horas. Fuente: elaboración propia. 107

8.1. Esquema de pasos previos de la investigación que permiten realizar un análisis de Costo-Beneficio de la realización del proyecto. 114
8.2. Gráfica de sensibilidad para Beneficio Social Neto con rango de tasa de interés recomendado por el MMA. Fuente: [Ministerio del Medio Ambiente, 2012]. . 117

Capítulo 1

Introducción

Es indiscutible que el problema de contaminación atmosférica es un fenómeno crítico para la sociedad actual altamente urbanizada en la que se encuentran englobados la mayoría de los habitantes del planeta. Esta problemática se ha ido acrecentando a la par con el desarrollo del sector industrial y automovilístico, en conjunto de la alta densidad poblacional de ciudades altamente urbanizadas, lo que a generado gradualmente efectos nocivos a corto y largo plazo para todos los seres vivos que están expuestos a fuentes de emisión de éstos contaminantes y que de manera directa o indirecta según una amplia gamma de estudios, contribuyen a la generación de distintos padecimientos y morbilidades a la salud.

En el presente trabajo, se propone una alternativa adicional al plan de compensación de emisiones del Ministerio del Medio Ambiente analizando el posible impacto que una medida de mitigación de concentración de material particulado localizada en cierta área determinada puede provocar en un sector de la Región Metropolitana de Santiago.

El actual problema referido a las condiciones en las cuales se encuentra la Región Metropolitana de Santiago en lo que respecta a niveles contaminación atmosférica por material particulado no es muy distinto a los altos niveles de contaminantes registrados año tras año en otras zonas tales como varias ciudades de E.E.U.U, México o China ([Revista El Tiempo, 2019]). y año tras año también hay cuantiosas pérdidas de vidas humanas debido a esto, así como un elevado gasto monetario de procedencia tanto pública como privada para poder mitigar las consecuencias de éste fenómeno. Este estudio pretende dar un enfoque distinto a como poder tratar el problema, el cual correspondería a los niveles de ciertos contaminantes específicos encontrados en la atmósfera de la ciudad de Santiago de Chile. Se plantea una solución alternativa y localizada utilizándose en un sector critico y específico dentro de la Región Metropolitana de Santiago, específicamente considerando una de las comunas históricamente mayormente afectadas por el nivel de contaminación atmosférica. El enfoque de esta posible solución del problema es realizado mediante un estudio de prefactibilidad técnico económico que contempla el uso hipotético de una tecnología emergente que capta directamente material particulado fino y grueso en un área restringida, y que de entre todas las otras tecnologías que están comenzando a implementarse alrededor del planeta, busca solucionar la problemática de una manera más directa y correctiva.

Para llevar a cabo el estudio, primeramente se realizará una breve revisión sobre las actuales normativas y medidas legales que se han encargado de regular los niveles de material particulado, medidas dictadas por la entidad reguladora del medioambiente en Chile (Ministerio del Medio Ambiente) y también algunas medidas sugeridas en guías establecidas por organizaciones internacionales y otros países distintos a Chile. Después de lo anterior, se prosigue presentando estrategias con un enfoque de carácter preventivas y correctivas que se han implementado como parte de las opciones de compensación de emisiones del Ministerio del Medio Ambiente en la Región Metropolitana y añadido a lo anterior se presentan distintas tecnologías que actualmente han sido utilizadas a nivel internacional para el control y mitigación de la problemática de niveles fuera de la norma de material particulado en distintas ciudades alrededor del mundo.

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivos del Proyecto

2.1.1. General

Elaborar un estudio de prefactibilidad técnico económico para la implementación de un equipo consistente en una torre de captación de material particulado de tamaños desde 2.5 a 10 [µm] la cual opera con el uso de tecnología de ionización positiva, para evaluarlo como alternativa de disminución de niveles de material particulado en el programa de compensación de emisiones del Ministerio del Medio Ambiente para un sector público dentro de la ciudad.

2.1.2. Específicos

Para poder llevar a cabo el objetivo general anteriormente mencionado, se considerarán los siguientes objetivos específicos:

- Identificar la situación actual de contaminación atmosférica en Santiago y las herramientas e iniciativas específicas impulsadas por el Ministerio del Medioambiente y otras entidades tanto públicas como privadas para el tratamiento del material particulado en sectores públicos y áreas verdes comunes.
- Reconocer el impacto del problema, analizando y evidenciando las consecuencias de mortalidad y morbilidad que la contaminación atmosférica por material particulado ocasiona en la población de Santiago.
- Realizar un breve estudio e identificación de actuales equipamientos y tecnologías locales e internacionales, así como también otras metodologías para el abatimiento de material particulado en sectores públicos y áreas verdes comunes, así como también otras estrategias alternativas que apoyen al programa de compensación de emisiones del PPDA.
- Realizar el estudio técnico correspondiente al comportamiento de los contaminantes en la zona elegida donde operará el equipo, mediante respaldo y modelación predictiva de concentración de material particulado con el uso de softwares de modelación y dispersión de contaminantes WRF y CALPUFF en la zona seleccionada, asi como también

la obtención de herramientas necesarias para el modelamiento como el inventario de emisiones del sector.

- Obtener el impacto cuantitativo en los casos de eventos de morbilidad en la población del sector utilizando las funciones dosis-respuesta en conjunto del comportamiento de contaminante entregado por el modelamiento y considerando la implementación del equipo de captación de material particulado en el área.
- Realizar el estudio económico, presentando los beneficios económicos posibles debido a la implementación del equipo, con ayuda de las funciones dosis-respuesta y contrastarlo con el costo de implementación completa del equipo, para poder evidenciar los posibles beneficios económicos entregados por el proyecto.

2.2. Metodología

La investigación tuvo como finalidad presentar un proyecto al Ministerio del Medio Ambiente para el área de mecanismos de compensación de emisiones atmosféricas. El proyecto constó de estudiar la implementación hipotética de un equipo capaz de disminuir la concentración de material particulado en un sector público, en un tiempo determinado y en cierta área restringida, con la intención de estimar posibles beneficios en la salud humana y menor gasto económico para parte de la población local de esa zona que se exponga a este equipo.

De la investigación realizada en el estado del arte, se presentaron variados equipos y estrategias nacionales e internacionales que están enfocadas a disminuir la concentración de material particulado en espacios públicos, de aquí se escogió un equipo de origen de Países Bajos llamado Smog Free Tower, creado por la empresa Studios Roosegaarde y aplicado exitosamente en varias ciudades con problemas críticos de contaminación atmosférica por material particulado (como por ejemplo ciudades de China y Korea). Seleccionado el equipo se procedió a estudiar el lugar geográfico clave para su posible implementación en la ciudad de Santiago de Chile.

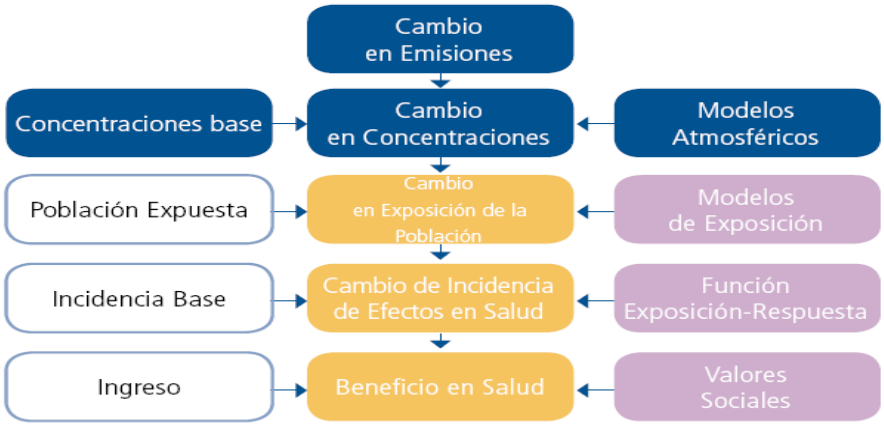


Figura 2.1: Esquema de factores a considerar entre la causa inicio de contaminación atmosférica hasta concluir en la salud de la población expuesta a la contaminación [Departamento de Economía Ambiental, 2013].

Para esto se realizó un proceso de análisis jerárquico multicriterio el cual permitió identificar la comuna con más problemas ocasionados por los niveles en la concentración de material particulado. En este método se consideraron los siguientes criterios al momento de escoger el sector: historial de material particulado fino y grueso (2.5 [µm] y 10 [µm] respectivamente), cantidad de población con mayor riesgo de salud por contaminación (menores a 4 años y mayores a 60 años), densidad de población de adultos mayores, tasa de mortalidad bruta y ajustada. De este análisis, dos candidatos destacaron respecto a las demás comunas: las comunas de Independencia y La Florida. Considerando ambas, se realizó posteriormente un análisis de posibles ubicaciones geográficas ideales para instalar el equipo debido a que éste es implementado en parques y plazas públicas. Para encontrar el sector específico para implementar la torre se consideraron áreas verdes cercanas a poblaciones de riesgo (hogares de adultos mayores) y centros de salud, de esto, se observó que la comuna de Independencia poseía un sector más idóneo, específicamente en el parque ubicado entre las calles Anibal Pinto y la avenida Fermín Vivaceta en la parte sur dentro de esta misma comuna.

Seleccionado el sector geográfico y el equipo, se decidió utilizar programas de modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos para estimar las concentraciones de material particulado fino y grueso en la ubicación geográfica específica a la cual se expondrá directamente la torre. Se consideró el mes de Agosto del año 2019 como información base para el modelado de Agosto del año 2020 debido a que de data estadística histórica, es uno de los meses con mayores niveles de contaminación atmosférica durante el año en la Región Metropolitana. Los programas utilizados para la modelación de dispersión de contaminante fueron los programas Weather Research and Forecasting Model (WRF®) y CALPUFF®. El primero de ellos utilizó la información climática y geográfica de la Región Metropolitana para predecir el comportamiento de la temperatura atmosférica, así como también la velocidad y dirección del viento en el sector seleccionado (factores que de bibliografía científica y epidemiológica son fenómenos claves para la predicción de concentraciones de material particulado en una zona geográfica particular). Posteriormente, CALPUFF®utilizó ésta base entregada por WRF®junto con el inventario de emisiones disponible para calcular las concentraciones de material particulado del sector (el inventario de emisiones usado en el programa CALPUFF®consideró fuentes areales de emisión de material particulado en la comuna de Independencia, fuentes móviles mediante aporte anual por calles de esta zona y un aporte de fuentes de emisión poblacional o residencial relacionada con la densidad poblacional de la zona).

La utilización de los programas anteriormente mencionados será debido a que se requiere estimar la concentración cercana a la que estará expuesto el equipo de manera más detallada, ya que por una parte, es difícil medir las concentraciones directamente en el sector y además se estima que la estación de monitoreo de contaminación atmosférica en el sector presenta diferencias en cuanto a los valores de concentración de contaminante en la ubicación del equipo, poniendo en duda la representatividad de la estación para los propósitos de esta investigación (observaciones que más adelante se justificarán con más detalle). Utilizando CALPUFF® se estimó la concentración de contaminante durante el mes escogido. El resultado entregado fue un perfil de concentraciones de material particulado medida en [µm/m^3] para cada hora y para cada día del mes de Agosto del año 2020 (697 horas fueron medidas a lo largo de cada día del mes) en el sector donde se pretende ubicar el equipo dentro de la comuna de Independencia.

Obtenida esta información, se utilizaron funciones dosis-respuesta, que son funciones matemáticas que relacionan la cantidad de afecciones a la salud en función de la variación de contaminante del sector geográfico y la población expuesta a éste. Se utilizaron los resultados del modelamiento en funciones específicas para distintas enfermedades relacionadas con los niveles de material particulado (las mayormente respaldadas y documentadas por estudios epidemiológicos), obteniendo para cada caso, cantidades estimadas de individuos que podrían evitar verse afectados por estas enfermedades respiratorias durante el período seleccionado gracias al aire tratado por el equipo. Se analizaron finalmente las pérdidas económicas que podría evitar la población expuesta, relacionando los valores obtenidos en las funciones dosis respuesta con equivalencias económicas debido a estas enfermedades, el método de evaluación fue sugerido por la Guía Metodológica para la elaboración de Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) creada por el Ministerio del Medio Ambiente. Finalmente se realizó una comparación con los costos totales asociados a la implementación del equipo para concluir en conjunto con los resultados técnicos la viabilidad del proyecto.

2.3. Estado del arte

2.3.1. Antecedentes, normas y estrategias para la reducción y control de contaminación atmosférica.

Actualmente en Chile, ciudades como Santiago son parte de las ciudades latinoamericanas con mayor índice de contaminación atmosférica por material particulado [Greenpeace, 2019]. Similar a otras ciudades como Temuco, Coyhaique u Osorno, la ciudad de Santiago a lo largo de todo el año tiene a su población continuamente expuesta a niveles insanos de material particulado (de ahora en adelante abreviado como MP) tanto fino como grueso (de 2.5 y 10 [µm] respectivamente) cuyos niveles de concentración en muchos días del mes e incluso en horas específicas del día superan las normas nacionales (normas primarias) e incluso las normas internacionales.

Esta fenomenología de aumento en la concentración de contaminantes es acentuada mayormente en algunas épocas del año, incrementando drásticamente por ejemplo en los meses de invierno (tipicamente rangos desde junio hasta agosto) ya que son potenciadas debido a la existencia de condiciones climáticas y geográficas imperantes que agravan la situación, logrando sobrepasar sobradamente los límites recomendados incluso a pesar de presentar promedios anuales mejores respecto a años anteriores.

De las figuras 2.2 y 2.3 se puede apreciar que prácticamente hasta el año 2018 pocas de las comunas o ciudades anteriormente expuestas alcanzan el nivel menor al recomendado por las normas nacionales respecto al MP fino y grueso (franja roja segmentada). De hecho, hasta ese mismo año, se estableció que Chile poseía 9 de las 10 ciudades más contaminadas de América del Sur [CNN, 2019].

Cabe destacar que existen zonas con peores valores o niveles de MP que Santiago como lo son variadas localidades en la zona sur o la actualmente conocida zona de Quintero. Para estos casos, se tiene una amplia cobertura en estudios e investigación, y a grandes rasgos se apunta a que los factores geográficos y meteorológicos en conjunto con las altas emisiones de contaminantes atmosféricos industriales, así como también el posible uso de leña y/o

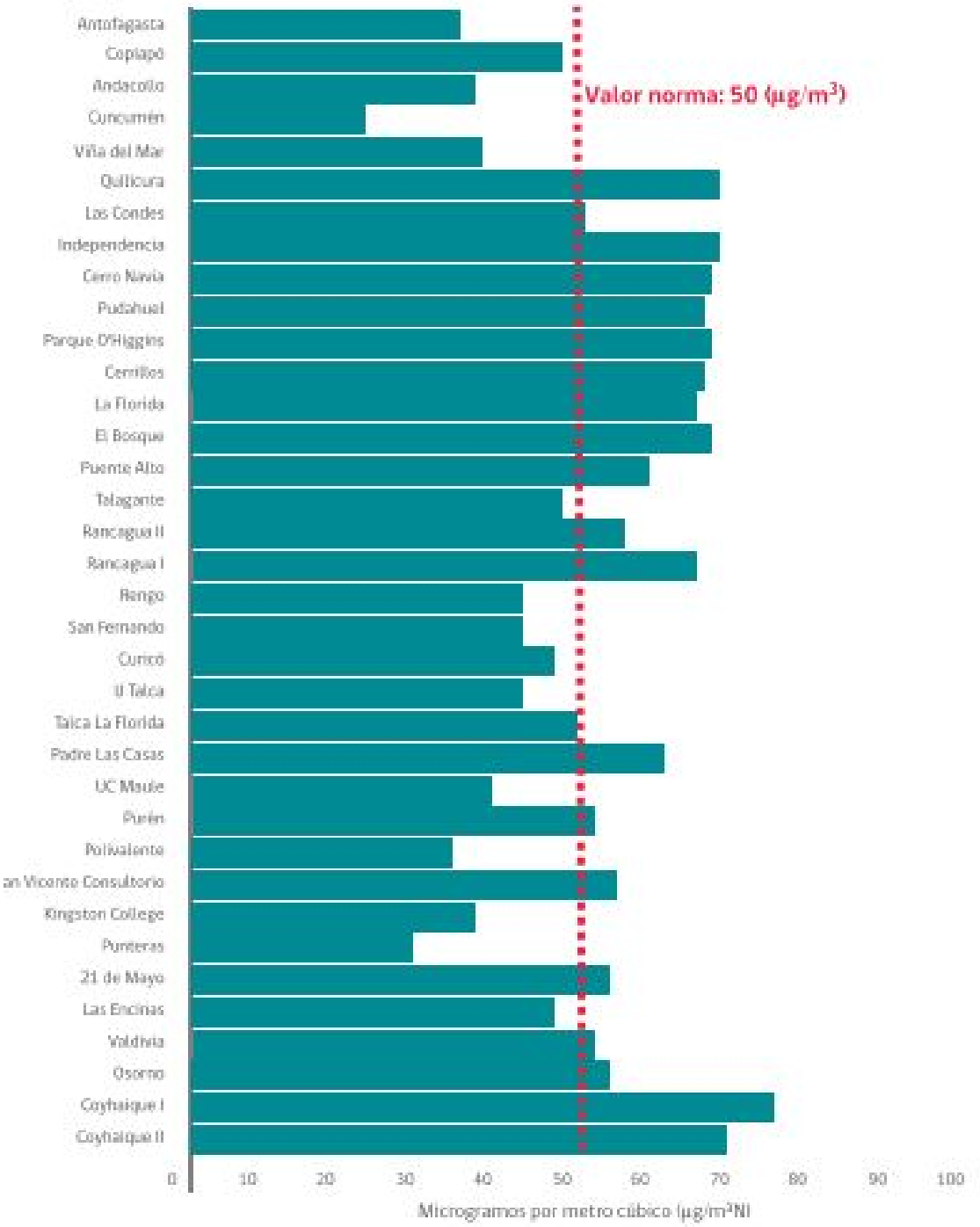


Figura 2.2: Gráfica del promedio trianual de MP 2.5 en estaciones de monitoreo del país en el año 2018. Fuente: pg. 110 [Ministerio del Medio Ambiente, 2019a].

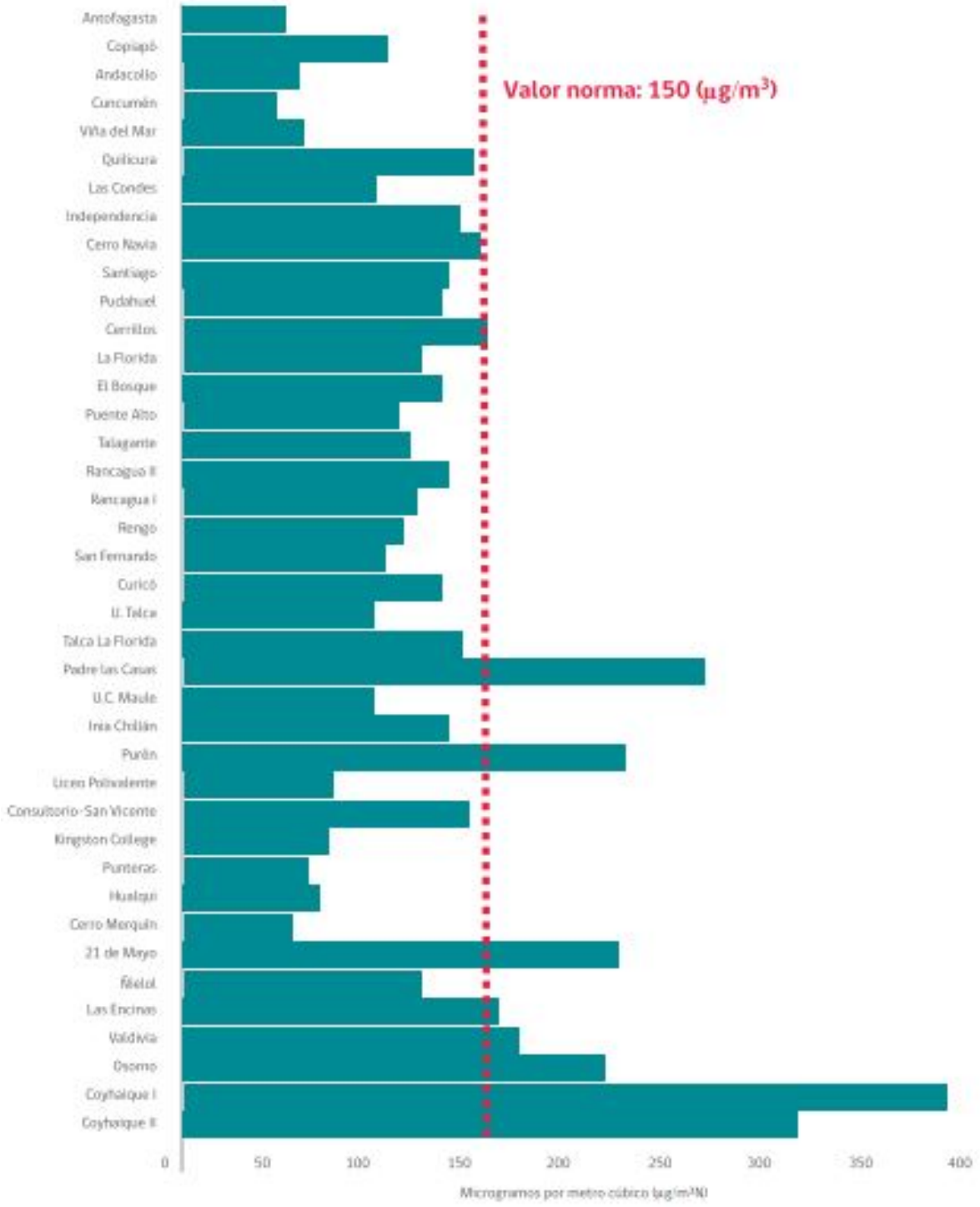


Figura 2.3: Gráfica del promedio trianual de MP 10 en estaciones de monitoreo del país en el año 2018 Fuente: [Ministerio del Medio Ambiente, 2019b].

combustibles fósiles para el uso como calefacción sobretodo en épocas de invierno provocan también estos aumentos de contaminación. [Ministerio del Medio Ambiente, 2016].

No obstante, y sin desmerecer las otras regiones, la provincia de la RM es una de las pocas regiones que sufren de otros factores extras de carácter geográficos y metereológicos que contribuyen a la generación de la contaminación atmosférica, tales como el fenómeno de inversión térmica, el perfil geográfico tipo cuenca o ya directamente la alta densidad poblaciónal de la región que conlleva paralelamente mayor uso y consumo de fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos, factores que analizarán con mayor profundidad posteriormente.

En lo que respecta a medidas para solucionar éste problema, actualmente en Chile existen variadas normas y decretos implementados para la protección atmosférica, así como también para la prohibición directa y/o disminución de diversos agentes contaminantes de origen tanto industrial como civil.

A continuación, se presentan las leyes en relación con la regulación del MP:

- Artículo 19 Números 8, 16, 21 y 24: establecen el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, dándole el deber al estado para velar por que este derecho no se vea afectado [Decreto 100, 2005].
- Ley N°19.300: establece un contexto o marco global respecto a la regulación del medio ambiente, así como también al derecho de los ciudadanos de vivir en un medio ambiente libre de contaminación. Además de lo anterior, ésta ley vela por la conservación del patrimonio medioambiental, controla los instrumentos de gestión ambiental tales como la evaluación ambiental estratégica, la Declaración de Impacto Ambiental, el Estudio de Impacto Ambiental (EIA), el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), controla el acceso y educación a la información ambiental, castigos y penalizaciones por el daño medioambiental, la fiscalización y el fondo de protección ambiental y la institucionalidad ambiental en Chile [Ley 19300, 1994].

En al año 2010 la ley N°20.417 fue promulgada y su objetivo fue el de agregar artículos que reformaron la ley N°19.300. Los aspectos más importantes fueron la disolución de la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) la creación del Ministerio de Medio Ambiente, comité de ministros, consejo de ministros para la sustentabilidad y Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). Crea además la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) y los tribunales ambientales.

Dentro de la ley anteriormente descrita existen dos normas:

1. Norma Primaria: Busca como objetivo la protección de la población humana dentro del territorio nacional. Ésta establece los valores de concentraciones máximas y mínimas permisibles de compuestos en ciertos períodos, así como también sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población [Ministerio del Medio Ambiente, 2015a].

   Para el caso del MP de tamaño 2.5 [µm] según el Articulo 1° de la norma primaria [Decreto 12, 2010] establece que deberá ser no mayor a veinte microgramos por metro cúbico (20 [$\mu g/m^3$]), como concentración promedio anual, y cincuenta micro-

gramos por metro cúbico (50 [µg/m^3]), como concentración promedio en 24 horas [Decreto 59, 1998].

Por otra parte, para el caso del MP de tamaño 10 [µm], según el Articulo 1° de la norma primaria establece que deberá ser no mayor a ciento cincuenta micrógramos por metro cúbico normal (150 [µg/m^3N]) como concentración promedio en 24 horas y cincuenta micrógramos por metro cúbico normal (50 [µg/m^3N]) como concentración promedio anual [Decreto 59, 1998].

2. Norma Secundaria: Busca como objetivo la protección del medioambiente dentro del territorio nacional. Para ello busca regular los niveles de concentración y períodos de sustancias o elementos que pueden afectar a éste y a la preservación de la naturaleza [Ministerio del Medio Ambiente, 2015a].

Además de las anteriores normas, existen los siguientes decretos (tanto activos como derogados) con su respectiva definición a grandes rasgos:

- Articulo 3°,Decreto 811 del Ministerio de Salud (actualmente derogado): consiste en prohibir el funcionamiento de chimeneas a base de leña u otros dendroenergéticos para la calefacción en viviendas y establecimientos de la Región Metropolitana [Decreto 811, 1993].

- Articulo 3°, Decreto 812 del Ministerio de Salud: complementa el procedimiento de compensación de emisiones de fuentes estacionarias puntuales dentro de la Región Metropolitana [Decreto 812, 1995].

- Articulo 4° Decreto 1583 del Ministerio de Salud: regula la concentración de MP de las fuentes estacionarias puntuales dentro de la Región Metropolitana que emitan más de una tonelada diaria de dicho material [Decreto 1583, 1993].

- Artículo 8° de la Ley N°20780: Establece un "impuesto verde" a la emisión de contaminantes tales como el MP, óxidos de nitrógeno y dióxidos de azufre, generado por fuentes fijas tales como calderas y turbinas [Ley 20780, 2014].

Respecto a las normas internacionales, existen varias recomendaciones de distintos países y organizaciones, tanto para MP2.5 como para MP10. A continuación se presentan algunas que las normas internacionales que sirvieron como guías para la creación de las normas nacionales anteriormente expuestas:

Tabla 2.1: Rangos de concentración de MP10 establecidos por normas de distintos países alrededor del mundo y organizaciones internacionales, los valores intermedios de la OMS hacen referencia a valores progresivos de reducción en el tiempo [Departamento de Normas y Políticas, 2016].

Organismo / País	24 horas (µg/m³)	Anual (µg/m³)
Australia	50	25
California	50	20
Chile	**150**	**50**
China (Clase 1)	50	40
China (Clase 2)	150	70
Corea del Sur	100	50
Escocia	50	18
Estados Unidos	150	-
México	75	40
Perú	150	50
Sudáfrica	75	40
Suiza	50	20
Unión Europea	50	40
Valor intermedio 1 OMS	150	70
Valor intermedio 2 OMS	100	50
Valor intermedio 3 OMS	75	30
Valor objetivo OMS	50	20

Normas internacionales para MP2.5:

- Norma estadounidense de la Agencia de Protección Medioambiental: propone un nivel máximo promedio anual de 15 [µg/m^3] y un máximo promedio diario de 65 [µg/m^3] [Woodard, 1998].
- Normativa de la Comisión de la Comunidad Europea: analiza valores para MP2.5 en promedio anual, el último valor correspondiente a esta norma es de 20 [µg/m^3] [Balmaceda E., 2016].
- Normativa establecida por la Secretaría de Salud de México: establece una norma de MP2.5 en promedio anual de 15 [µg/m^3] y en promedio de concentración en 24 horas de 65 [µg/m^3] [Balmaceda E., 2016].
- Normativa según la OMS: para el MP10 contempla objetivos anuales intermedios I, II y III a cumplir, que corresponden a 35 [µg/m^3], 25 [µg/m^3] y 15 [µg/m^3] respectivamente, con un nivel recomendado de 10 [µg/m^3], y para el caso de los objetivos intermedios para concentraciones en 24 horas, los objetivos intermedios I,II y III corresponden a 75 [µg/m^3], 50 [µg/m^3] y 37.5 [µg/m^3], con un nivel recomendado de 25 [µg/m^3] [Organización Panamericana de la Salud, 2005].

Tabla 2.2: Medidas tomadas por el PPDA para el control de niveles de MP en la RM [Departamento de Economía Ambiental, 2013].

Fuente	Sector	Medida
Móviles	Transporte Público	EURO IV / EPA 2007 con Filtro de Partículas (2012)
		Uso de combustible dentro de especificación
	Vehículos pesados	EURO III / EPA 98 con Filtro de Partículas (2010)
		EURO IV / EPA 2007 con Filtro de Partículas (2012)
	Vehículos livianos	Restricción vehicular de carácter permanente (4 SSV)
		Uso de combustible dentro de especificación
	Ciclovías	Programa de construcción de ciclovías urbanas
Fijas	Industria	Metas de reducción de emisiones de MP y NO_x establecidas para mayores emisores
		Programa de reducción de Dióxido de Azufre (SO_2) en mayores emisores
		Norma de Emisión de Dióxido de Azufre (SO_2) para Fuentes Estacionarias
Difusas	Leña	Regulación para el uso de calefactores. Gestión de Episodios Críticos (GEC)
	Quemas agrícolas	Erradicación de quemas agrícolas
	Áereas Verdes	Plan Santiago verde

2.3.2. Plan de acción actual del gobierno de Chile: SEIA y el PPDA.

En nuestro país, tal como se mencionó anteriormente, se tiene un instrumento de gestión ambiental de tipo preventivo conocido como Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), el cual analiza el impacto ambiental posible de un nuevo proyecto antes que éste se implemente. Este instrumento, actualmente administrado por el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) busca establecer los pasos a seguir para la correcta modelación y predicción de la situación futura, entregando y recomendando herramientas de análisis especiales para los proyectos que, entre otras cosas, necesitan cuantificar su impacto ambiental. Junto con lo anterior, también existen las herramientas de Declaración de Impacto Ambiental (DIA), y Evaluación de Impacto Ambiental (EIA).

Por otra parte, numerosas medidas y planes se han realizado a lo largo de los años para controlar las emisiónes de contaminantes y la exposición de la población a los distintos compuestos atmosféricos potencialmente tóxicos. En general, estas medidas históricas lograron disminuir los niveles de los compuestos dióxido de nitrógeno (NO_2) y monóxido de carbono (CO) mediante regulaciones al sector industrial, regulación de emisiones residenciales, retiro de transporte altamente contaminante, fiscalización de normas, mejoramiento de calidad de combustibles e introducción de automóviles catalíticos, lo que logró en cierta medida considerar a la Región Metropolitana como zona ya no saturada por éstos compuestos.

El plan de prevención y descontaminación atmosférica (PPDA) implementado en la Región Metropolitana es otra estrategia que en conjunto con el respaldo del SEIA ha sido hasta el día de hoy una estrategia que mediante sus medidas preventivas y correctivas ha logrado disminuir considerablemente respecto a años anteriores los niveles de MP, como se aprecia en la Fig. 2.4.

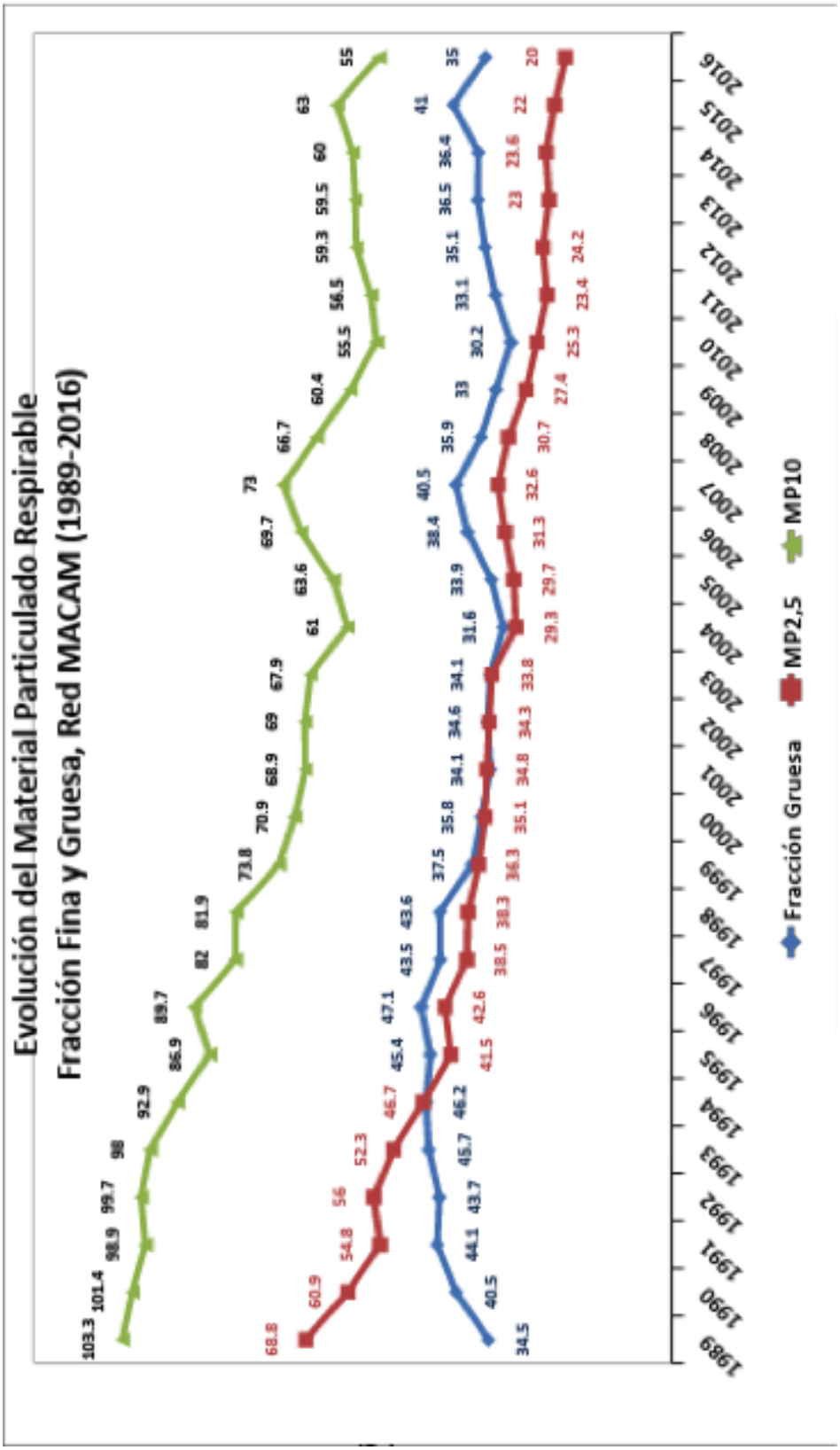


Figura 2.4: Concentración MP10 y 2.5 en la Región Metropolitana en [ug/m3] desde el año 1989 hasta el año 2016, medidas y elaboradas por el Departamento de Redes de Monitoreo [Secretaría Regional Ministerial, 2018].

Prontamente, producto de la alta explosión demográfica de la Región Metropolitana, mayor actividad industrial y actividad en el sector transporte, esta reducción de ambos tipos de MP se volvió insuficiente, incumpliendo las metas de calidad de aire establecidas bajo las normas utilizadas específicamente durante varios días dentro de los meses de invierno.

Aún hoy, continúan produciéndose preemergencias y alertas ambientales, así como también pérdidas humanas debido a muertes prematuras y morbilidad atribuidas al MP con sus respectivas pérdidas económicas, por lo que es tentativo explorar métodos directos de tratamiento y disminución de contaminantes atmosféricos en zonas públicas en paralelo al trabajo de enfoque preventivo y correctivo del actual PPDA.

2.3.3. Enfoque tecnológico para tratamiento directo de la contaminación atmosférica: ¿Qué se está haciendo en Chile y el mundo?

Definiendo como sector público a parques y plazas de recreación ciudadana, actualmente Chile aún no está completamente desarrollado y abierto para la innovación y aplicación de tecnologías para la captura de contaminantes atmosféricos en estos sectores. Tampoco existen proyectos en proceso de incubación o con financiamiento por parte de entidades como CORFO o la Seremi del Medio Ambiente para el caso de la región Metropolitana y que a su vez traten éste problema mediante uso de nuevas tecnologías. Por parte del PPDA, se cuenta con una estrategia, llamada plan de compensación de emisiones (PCE). El plan de compensación de emisiones es una herramienta aprobada por el Seremi del Medio Ambiente y fiscalizada por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), el cual consiste en un mandato que deben emitir todos aquellos proyectos, sean nuevos, o modificaciones de proyectos existentes, que sobrepasen los límites de emisión máxima de MP u otros compuestos catalogados nocivos para la atmósfera y la población, todo esto bajo el marco de los artículos 63 y 64 del PPDA.

Mediante un estudio que evalúa la emisión de los proyectos, llamada Resolución de Calificación Ambiental (RCA), se estiman las emisiones que un proyecto pueda emitir a la atmósfera y posterior a eso, se toman medidas de control, preventivas o directamente correctivas en caso de sobrepasar el límite establecido:

Tabla 2.3: Emisión máxima de proyectos dentro de la Región Metropolitana según el art. 64 del [Decreto 31, 2016]. Fuente: [DFM Consultores Ambientales, 2019].

Contaminante	**Emisión máxima (t/año)**
Material particulado respirable (MP10)	2,5
Material particulado fino (MP 2,5)	2
Óxidos de Nitrógeno (NO_x)	8
Dióxido de Azufre (SO_2)	10

Junto con cumplir determinadas condiciones para que los mecanismos de compensación de emisiones se consideren como viables, el programa exige una compensación de las emisiones para los proyectos que ingresen al SEIA de un 120 % respecto a lo que ellos emiten de contaminante.



Figura 2.5: Implementación de Techo verde en centro juvenil Gary Corner, Chicago, EEUU [DFM Consultores Ambientales, 2019].

Dicho esto, los únicos y actuales mecanismos de compensación de emisiones registrados son los siguientes:

- Recambio de Calefactores.
- Chatarrización de Motores.
- Filtros para fuentes fijas industriales y/o comerciales.
- Filtros para fuentes móviles.
- Implementación o regeneración de sistema SCR para fuentes móviles.
- Recambio y mejoras tecnológicas para calderas.
- Pavimentación de calles.
- Techos y/o muros verdes.

De las anteriores, la compensación de emisiones mediante pavimentación de calles y techos o muros "verdes" son las medidas más próximas a lo que se consideraría como tecnologías para la captación de MP y otros elementos atmosféricos nocivos en sectores públicos. A grandes rasgos la tecnología de muros "verdes" consta de implementar diversos tipos de especies vegetales, no muy exigentes en su mantención y con excelente capacidad captadora de contaminantes presentes en la atmósfera. Actualmente se estudia la eficacia que presentarían éstos en la región metropolitana, aunque ya en Santiago existe una implementación de techo verde en el edificio Amapolas en Ñuñoa similar a un techo construido en Chicago, E.E.U.U., como se aprecia en las fig. 2.5 y 2.6.

Otra herramienta preventiva es el monitoreo y registro de contaminantes atmosféricos.



Figura 2.6: Implementación de Techo Verde en edificio Amapolas, Ñuñoa, Región Metropolitana, [DFM Consultores Ambientales, 2019].

En la Región Metropolitana se cuenta actualmente con la red MACAM, una red de monitoreo automático de calidad del aire, la cual consiste en un sistema de redes y estaciones de vigilancia en tiempo real que entregan información sobre los niveles de concentración y las tendencias de los contaminantes atmosféricos presentes en la provincia de la RM.

Los equipos de medición específicamente para MP de estas estaciones utilizan la metodología de atenuación BETA-MET ONE 1020 basadas en el principio de la ley de Beer (para más información revisar Anexo A)

2.3.4. Tecnologías internacionales

Finalmente, existen variados equipos y proyectos desarrollados en otros países para el abatimiento directo de "smog" y MP de zonas públicas. Algunos de estos proyectos se encuentran patentados y en actual implementación y operación, otros por otra parte se encuentran en vías de mejoras o en fase de prototipos. A continuación se muestran algunos de los más desarrollados por distintas empresas y entidades en distintos países:

1. Paneles y torres captadoras de contaminación atmosférica mediante musgo:

   Tecnología alemana, propiedad de la compañía Green City Solutions y comercializada en el Reino Unido por la empresa Evegen Systems, la cual consiste en un panel de aproximadamente 4 [m] de alto por 3 [m] de ancho, conocido como CityTree® Éste panel es llenado en sus paredes con tipos de musgos de gran área superficial en sus hojas y que poseen una alta capacidad de absorción de CO_2, NO_x, O_3 y MP. Según

la compañía, éste panel realiza el trabajo de 275 árboles normales, absorbiendo hasta 240 toneladas métricas de CO_2 anual, además de poseer sensores que miden la calidad del aire y calculan la eficiencia del panel constantemente para reducir la electricidad consumida de los propios paneles solares que ésta posee [Greencity Solutions, 2021].



Figura 2.7: Panel de musgos "Citytree" propiedad de la empresa Green City Solutions [Greencity Solutions, 2021].

2. Torre gigante purificadora de aire en China:

   Torre de aproximadamente 100 [m] de altura, diseñada por investigadores del instituto de Medio Ambiente de la Tierra de la academia de Ciencias de China e implementada en la ciudad de Xi'an. La torre en su base posee invernaderos que cubren aproximadamente la mitad de una cancha de futbol, el aire contaminado es captado por estos invernaderos y una vez purificado, es calentado y sale desde la torre, habiendo pasado por varios filtros más en su trayecto de salida. La torre tiene un radio de acción de aproximadamente 10 kilómetros cuadrados y según estudios preliminares en los primeros meses de operación, la torre ha logrado disminuir el MP fino y grueso entre un 15 % y un 20 % en toda la localidad, produciendo en ese período un aproximado de 10 millones de metros cúbicos de aire limpio.



Figura 2.8: Torre purificadora en la ciudad de Xi'an, China [Raya, 2018].

3. Paredes con compuestos químicos fotocatalizadores que absorben elementos de la atmósfera:

   Tecnología creada por arquitectos alemanes del estudio Elegant Embellishments. Esta tecnología llamada Prosolve®actualmente implementada en Ciudad de México consiste en una fachada que rodea edificios creando una formación tipo "red". Su estructura puede estar recubierta por dióxidos de distintos metales tales como dióxido de titanio (TiO_2) los cuales actúan como fotocatalizadores utilizando los rayos ultravioletas del sol. Esto produce una reacción química entre las partículas nocivas del aire tales como el CO_2, NO_x y el MP con los compuestos químicos presentes en la estructura de la pared. Dependiendo del tamaño de la superficie con el revestimiento, en algunos casos se pueden absorber la misma cantidad de gases que emiten desde 10.000 a 9.000 automóviles diarios. En Chile, la ingeniera María Ignacia Lucares de la Universidad de Santiago se encuentra actualmente trabajando con este tipo de materiales, pero con distinta morfología y con uso de nanotecnología patentada [Departamento de Relaciones Internacionales e Interuniversitarias, sf].

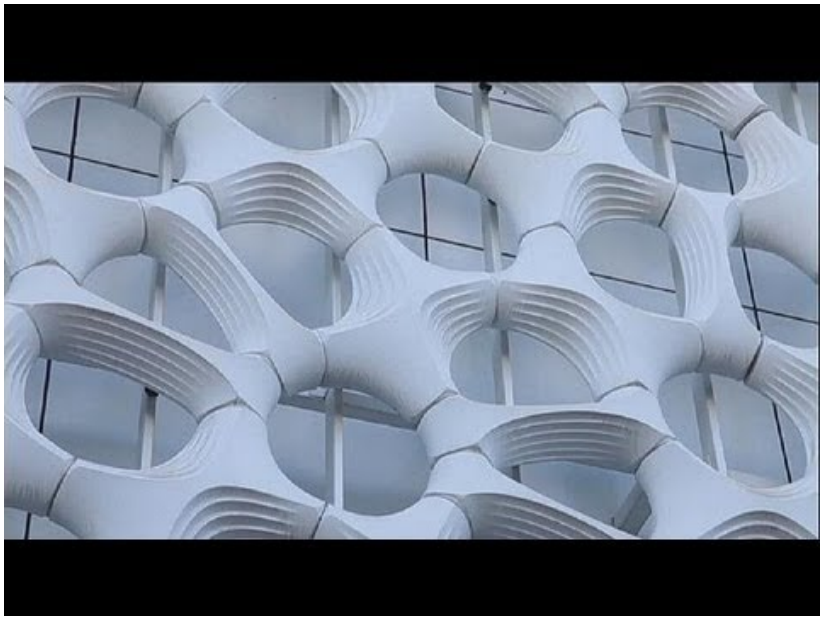


Figura 2.9: Estructura de TIO_2 implementada en la fachada del hospital Gea González en México [De Oriente a Occidente, 2013].

4. Torres cubiertas de vegetación:

   Estructuras cubiertas con cierto tipo de plantas que tienen mayor capacidad de absorción de óxidos de azufre y nitrógeno a diferencia de otras especies, incluso con la capacidad de absorber virus y bacterias. Esta tecnología llamada Airbol®desarrollada por el científico Andrés Fernández miembro de la empresa Contreebute, propone mejorar la calidad del aire en un radio de 80 [m] a la redonda. Inicialmente el aire entra a una zona de la estructura eléctrica para poder ionizar el aire y así dividir sus moléculas. Posterior a esto, un rocío interno deposita las partículas en un tanque de agua con el cual se nutrirán posteriormente las plantas de la estructura. Su capacidad de filtración es de alrededor de 22.000 [m^3/h].



Figura 2.10: Estructura "Airbol" que fue implementada en la ciudad de Medellín, Colombia [Redacción El Tiempo, 2016].

5. Torres de microalgas:

   Tecnología implementada en la Ciudad de México, y creada por el biólogo Carlos Monroy Sampieri. Ésta tecnología llamada BioUrban®consiste en un sistema de microalgas instaladas en torres las cuales poseen la capacidad de purificación de 368 árboles y 10 veces mayor que las plantas normales. Tienen distintas alturas dependiendo del área en la cual se deseen implementar y mediante fotosíntesis son capaces de capturar CO_2 y también retener otros contaminantes atmosféricos. Funcionan con energía solar [Villanueva, 2019].



Figura 2.11: Ejemplos de torres de microalgas modelo Biourban 2.0 y Biourban industrias [Villanueva, 2019].

6. Filtro vivo de humo de leña en Temuco:

   Equipo de filtro consistido de un muro "verde" descontaminante que atrapa las partículas de combustión a leña, además de reciclar residuos de ésta y usarlos como nutrientes para las plantas ubicadas en el mismo muro. La empresa Chilena creadora Hidrosym afirma que, de aplicarse en hogares del sur de Chile, se podría disminuir hasta en un 85 % la polución atmosférica de ciertas localidades. Existen Filtros Vivos tanto habitacionales como industriales.



Figura 2.12: Prototipo Filtro Vivo Doméstico implementado en la ciudad de Temuco, Chile [Hydrosim, sf].

7. Bicicleta anti-smog:

   Dispositivo que se puede instalar en el manubrio de una bicicleta, el cual inhala y filtra el aire contaminado de MP y posteriormente lo exhala en dirección a la cara del ciclista, inspirado en el animal mantarraya y su método de filtración del agua para colectar comida. Éste dispositivo es parte de "Smog free Project" (proyecto libre de smog), creado por Daan Roosegaarde de los estudios Roosegaarde, el cual es un proyecto que ofrece variadas soluciones con innovación urbana para reducir la contaminación atmosférica en las ciudades [Studio Roosegaarde, 2019].



Figura 2.13: Bicicleta "Smog free" puesta a prueba e implementada en la ciudad de Beijing, China [Studio Roosegaarde, 2019].

8. Otros ejemplos:

   Adicionalmente, existen variadas empresas internacionales que se dedican específicamente al área de proyectos urbanos para el combate contra la contaminación atmosférca. Una de las principales es la empresa ENS-Cleanair ubicada en los países bajos la cual tiene como finalidad acabar con el MP de las zonas urbanas altamente contaminadas. Esto lo realizan mediante el desarrollo de proyectos sustentables, sostenibles y seguros. Han desarrollado variados proyectos tales como filtros para estacionamientos, ecodomos e incluso colectores de MP para fábricas tales como el proyecto Pepsico o Vitelia Voeders entre otros.



Figura 2.14: Diversos proyectos realizados por la empresa ENS [ENS, sf].

Presentadas las tecnologías externas y las estrategias nacionales, se puede identificar inicialmente una oportunidad en cuanto a la importación y aplicación hipotética de otras tecnologías para ciudades como Santiago de Chile, más aún si éstas tecnologías ya están desempeñandose en ciudades con el mismo problema de saturación por material particulado, por lo que seguir investigando la implementación de un proyecto así podría traer consecuencias positivas para la sociedad y para el enfoque actual que el Ministerio del medioambiente busca en lo que respecta a mitigación de material particulado.

Capítulo 3

Fenómeno de contaminación atmosférica por material particulado

3.1. Contexto global

3.1.1. Estado y calidad de aire en ciudades altamente pobladas

Mundialmente el problema medioambiental de contaminación atmosférica hasta el día de hoy continúa afectando mayormente a todos los habitantes de ciudades urbanizadas y/o pueblos de alta densidad demográfica. Esto se ha ido agravando a la par desde la revolución industrial y la explosión demográfica humana, y no ha podido solucionarse de manera exitosa, conllevando a numerosas consecuencias humanas, ambientales y económicas a lo largo de todo el globo terrestre.

Para contextualizar, según la OPS [Organización Panamericana de la Salud, s f], en todo el mundo, cerca 7 millones de muertes prematuras fueron atribuibles a la contaminación del aire ambiental en 2012, siendo esta contaminación fuertemente relacionada con el uso de combustibles fósiles y practicas de cocina deficiente.

De la Fig. 3.1 es posible evidenciar que la mayoría de la población global está constantemente expuesta a la contaminación de aire y MP con valores muy por encima de la norma según las directrices establecidas por la OMS. Esto pone en cierta evidencia que el problema de la calidad de aire y la exposición de las personas a éste es un problema presente en todos los países, y más en los altamente industrializados y con alta densidad demográfica.

Mortalidad prematura, cáncer de pulmón, enfermedades pulmonares, enfermedades cardio y cerebrovasculares, neumopatías crónicas y agudas, bronquitis, y asma son sólo algunas de las enfermedades que se ven potenciadas continuamente debido a las condiciones atmosféricas deficientes de las zonas urbanizadas en estos países y a la exposición prolongada de las personas a estas condiciones atmosféricas [Organización Mundial de la Salud, 2021] y variados son los compuestos químicos nocivos presentes en el aire que tienen impacto directo en estas enfermedades, los cuales según la OMS se repiten en su mayoría en todas las ciudades con elevada contaminación atmosférica.

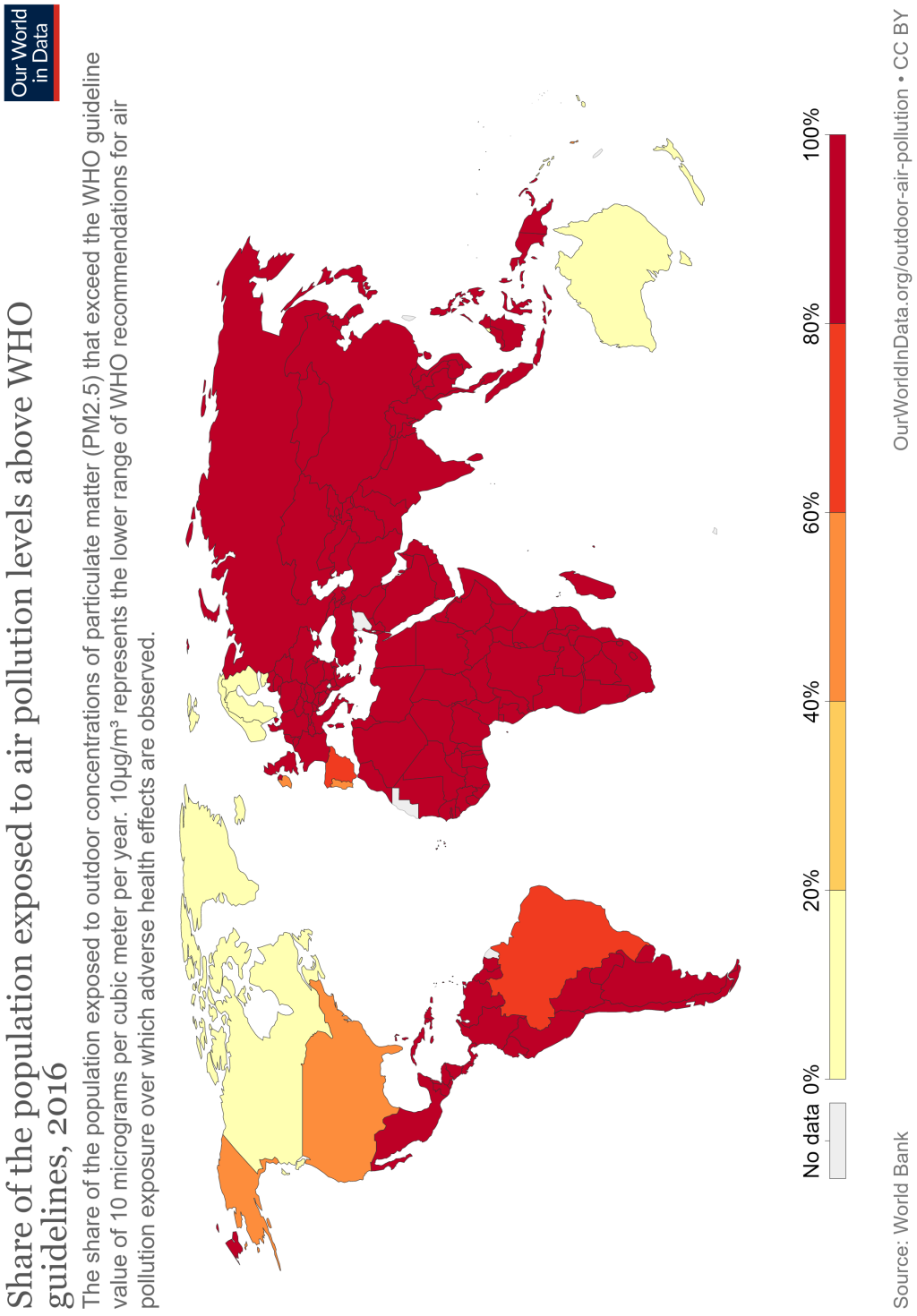


Figura 3.1: Mapa de la población mundial expuesta a niveles superiores de material particulado según lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud en el año 2016, la escala corresponde al porcentaje de población del país expuestas a concentraciones que exceden la norma [Brauer, M. et al., 2016].

Calidad de aire en ciudades altamente pobladas.

En la Fig. 3.2, se presentan brevemente los principales contaminantes que se encuentran habitualmente en las ciudades más contaminadas del mundo hasta el año 2000:

Ciudad	SO_2	PTS	Plomo	CO	NO_2	O_3
Bangkok	*	***	**	*	*	*
Beijing	***	***	*	---	*	**
Bombay	*	***	*	*	*	---
Buenos Aires	---	**	*	---	---	---
Cairo	---	***	***	**	---	---
Calcutta	*	***	*	---	*	---
Delhi	*	***	*	*	*	---
Jakarta	*	***	**	**	*	**
Karachi	*	***	***	---	---	---
Londres	*	*	*	**	*	*
Los Angeles	*	**	*	**	**	***
Manila	*	***	**	---	---	---
Ciudad de México	***	***	**	***	**	***
Moscú	---	**	*	**	**	---
New York	*	*	*	**	*	**
Rio de Janeiro	**	**	*	*	---	---
Santiago	*	***	*	**	**	***
São Paulo	*	**	*	**	**	***
Seoul	***	***	*	*	*	*
Shanghai	**	***	---	---	---	---
Tokyo	*	*	---	*	*	***

Fuente: ARIC (1996)

Significado de la notación:

***	Problema serio, estándares de OMS excedidos en más del doble
**	Serio a moderado, exceso inferior a dos veces. Estándares de corto plazo excedidos regularmente
*	Baja contaminación. Estándares de OMS se exceden ocasionalmente
---	No hay información suficiente para evaluación

Figura 3.2: Niveles de contaminantes en algunas de las ciudades con mayor densidad poblacional en el mundo. Fuente: [O'Ryan and Larraguibel, 2000].

Tal como se mencionó anteriormente se puede observar claramente esta problemática común de niveles de contaminación atmosférica en ciudades altamente pobladas, observándose presentes en la mayoría de ellas todos los compuestos químicos típicamente nocivos para el ser humano a nivel atmosférico (los efectos de cada uno se detallarán posteriormente).

Profundizando más, estas ciudades tienen un nivel de desarrollo muy elevado en tres principales áreas que, según los estudios, son las áreas que más inciden en la contaminación atmosférica urbana: actividad industrial, actividad vehicular y quema de leña o combustibles fósiles para uso civil.

Clasificación de los contaminantes atmosféricos usualmente presentes, identificación y efectos en la salud.

Dependiendo del origen de las sustancias contaminantes emitidas hacia la atmósfera, primero se identifican dos tipos [Ministerio del Medio Ambiente, 2016]:

- Contaminantes primarios: Sustancias químicas que proceden directamente de alguna fuente de emisión hacia la atmósfera (sea una fuente en movilización o una fuente estática), ejemplos: artefactos de calefacción domiciliarios, tubos de escape de automóviles de cualquier tamaño, cigarros, chimeneas industriales, incendios forestales entre otros.
- Contaminantes secundarios: Contaminantes generados en la atmosfera mediante reacciones físico-químicas que utilizan contaminantes primarios como precursores. Pueden utilizarse uno o más contaminantes primarios para la generación de contaminantes secundarios. Ejemplos: Ozono (O_3) troposférico generado a partir de reacciones con óxidos de nitrógeno (NO_x) y en presencia de luz solar o también la lluvia ácida formada por la reacción de dióxido de azufre (SO_2) o el (NO_x) con el agua.



Figura 3.3: Un caso típico de contaminación en ciudad altamente poblada es el ejemplo de contaminación por Ozono troposférico en la ciudad de Madrid, España [El Independiente, 2018], donde los contaminantes primarios (NO_x) reaccionan catalizando la formación de este ozono troposférico.

Los compuestos químicos que contribuyen a la contaminación atmosférica mayormente (sean primarios o secundarios) y que están presentes en las ciudades anteriormente expuestas son los que se presentan a continuación:

Tabla 3.1: Compuestos que mayormente participan en la contaminación atmosférica y sus efectos en la salud. Fuente: elaboración propia.

Contaminante	Efectos en la salud
SO_2	Cuando es inhalado, irrita la nariz y las vías respiratorias, provoca toz convulsiva en conjunto a una sensación de obstrucción en el pecho, broncoconstricción y agrava enfermedades respiratorias y cerebrovasculares [Instituto para la Salud Geoambiental, 2013].
Pb	Una vez aspirado, las partículas de plomo se introducen en la sangre y se depositan en los huesos. Afecta al sistema nervioso, las funciones renales, el sistema inmune, reproductivo y cardiovascular. Afecta especialmente a los menores de edad provocando incluso problemas de conducta y deterioro del CI [Organización Mundial de la Salud, 2019].
CO	Altamente reactivo con la hemoglobina contenida en la sangre, reduciendo la capacidad de ésta para transportar oxígeno al cuerpo. Se cree que es también neurotóxico debido a sus propiedades desmienilizadoras para las neuronas [Murcia + Salud, sf] .
NO_x	En la salud humana provoca inflamación de las vías respiratorias, daños a órganos internos, infecciones en pulmones e insuficiencia respiratoria. En el medioambiente genera acidificación y eutrofización en ecosistemas [Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico., sfb].
O_3	A nivel estratosférico (10-50 [km] sobre la tierra) ejerce un efecto positivo de protección contra la radiación. A niveles troposféricos es un potente agente oxidante. Provoca irritación e inflamación de vías respiratorias, asma, e incluso es un potencial acelerador de la mortalidad prematura [Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico., sfa].
MP	Dependiendo del tamaño de partícula, ésta afecta principalmente al sistema respiratorio y cardiovascular. Sus efectos en la salud humana son variados: muerte prematura por enfermedades al corazón y pulmones, irritación de vías respiratorias, toz, disminución de actividad pulmonar y agravación del asma e incluso muerte fetal e infantil [Vargas R., 2011].

Tabla 3.2: Compuestos que mayormente participan en la contaminación atmosférica y sus efectos en la salud. Fuente: elaboración propia.

Contaminante	Fuentes típicas
SO_2	Industrias de la pulpa y manufacturación de papel, refinerías de petróleo y metales. Combustión de combustibles fósiles como en plantas de energía a base de quema de carbón. Transporte vehicular con uso de combustibles fósiles [Instituto para la Salud Geoambiental, 2013].
Pb	Principalmente la industria del procesado de metales y aviación de tipo motor-pistón. También proveniente de incineradores de basura y baterías. En menor medida de combustibles vehiculares [Organización Mundial de la Salud, 2019].
CO	Proveniente en su mayoría de combustión incompleta de carburantes móviles así como también de calefactores e industrias. También producido por incineración de residuos [Murcia + Salud, sf].
NO_x	Producidos principalmente en los procesos de combustión vehicular y en especial los que utilizan motores diesel. También proveniente de instalaciones industriales de alta temperatura y de generación eléctrica. [Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico., sfb].
O_3	Originado principalmente mediante reacciones cercanas a fuentes emisoras de sus gases precursores (N_O, NO_2, COV, CH_4, CO) [Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico., sfa].
MP	Se genera por "aglutinamiento" de los otros compuestos químicos presentados y es producido por procesos de combustión de material sólido y líquido, actividades agrícolas e industriales, tráfico y combustión vehicular, erosión de suelos, caminos y carreteras, incendios forestales, etc. [Vargas R., 2011].

De los compuestos químicos descritos anteriormente, la investigación se centrará en el comportamiento, dispersión y consecuencias del material particulado, específicamente del material particulado de tamaños de 2.5 [µm] a 10 [µm] respectivamente.

Capítulo 4

Marco teórico referencial

4.1. Contaminante clave: material particulado, procedencia y características.

Se conoce como material particulado al conjunto de partículas sólidas y/o líquidas presentes en suspensión en la atmosfera las que pueden ser originadas por fuentes tanto humanas (antropogénicas) como naturales, y además poseen propiedades morfológicas, termodinámicas, químicas y físicas muy variadas [Arciniégas S., 2012].

Respecto a la caracterización fisicoquímica del material particulado, se aprecia que estas partículas pueden contener uno o varios de los compuestos químicos descritos anteriormente y su composición química variará según su caracterización por el diámetro de partícula y su origen de emisión:

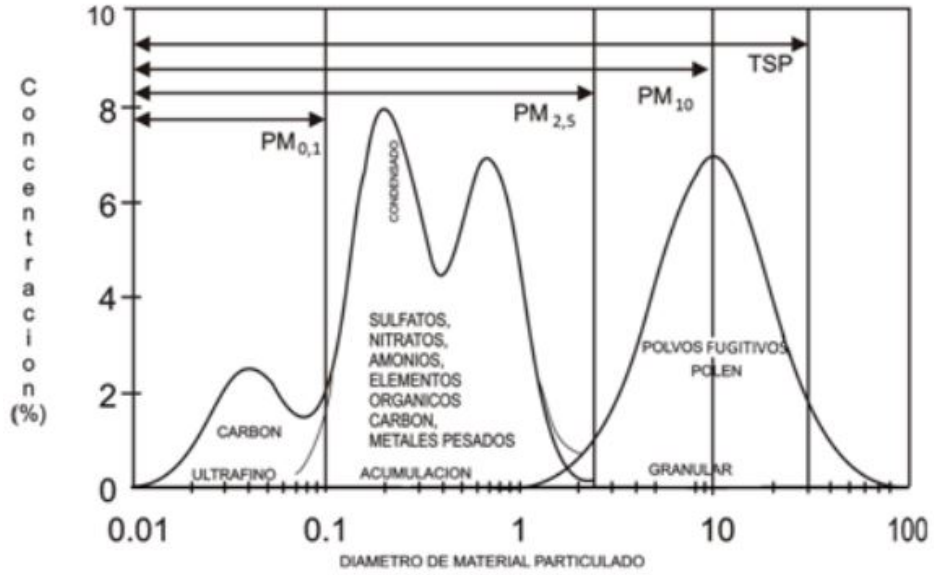


Figura 4.1: Distribución de los compuestos químicos contenidos en el MP variando según el diámetro, para zonas urbanizadas. Fuente: [Arciniégas S., 2012].



Figura 4.2: Particulas de material particulado observadas mediante microscopía electrónica. Fuente: [Centro de Ciencias Ambientales, sf].

Para el caso del material particulado de tamaño 2.5 [µm] encontrado en la RM, mediante la información entregada y analizada por las estaciones de monitoreo de SINCA y el Ministerio del Medioambiente (MMA), es posible saber la composición química aproximada:

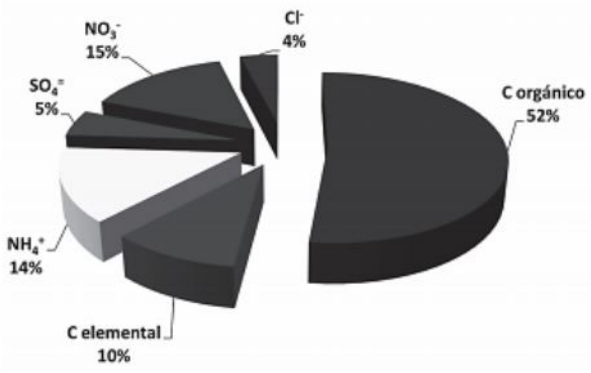


Figura 4.3: Caracterización del MP 2.5 en la región metropolitana de Santiago en año 2015. Fuente: [Decreto 31, 2016].

Por otra parte, para el caso del material particulado de 10 [µm] es posible identifi-

car una composición química variada en el caso de la ciudad de Chillán similar a la de la Región Metropolitana según el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire [Celis Hidalgo et al., 2007].

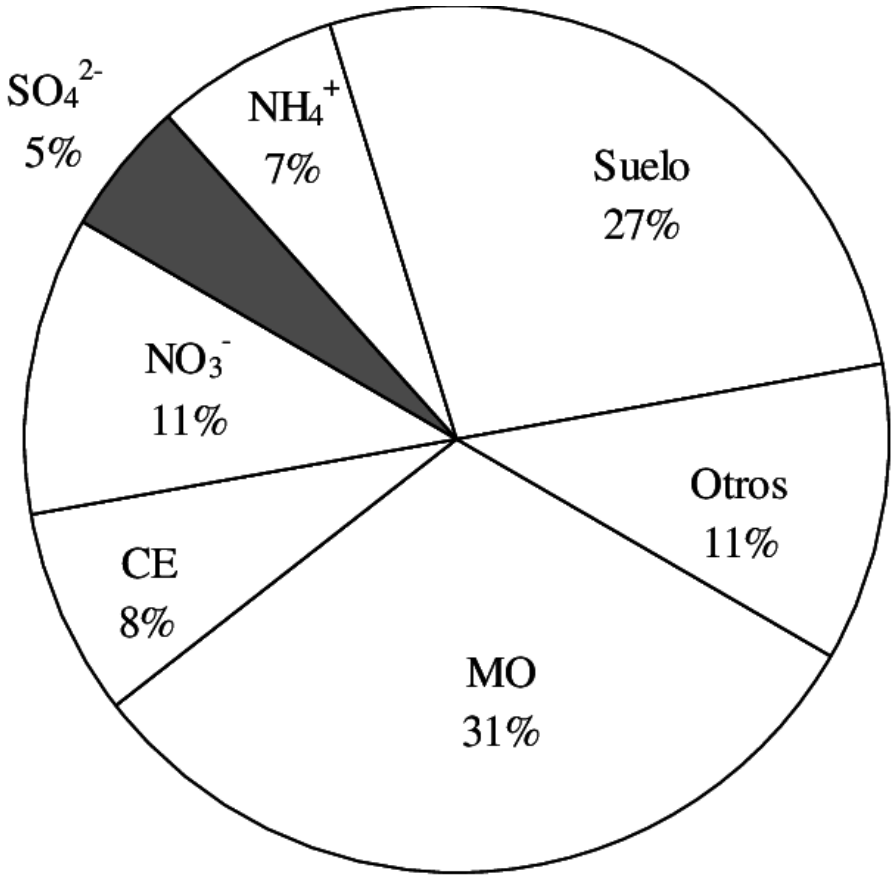


Figura 4.4: Caracterización del MP 10 en la zona urbanizada de Chillán, Chile. Fuente: [Celis Hidalgo et al., 2007].

De acuerdo a la investigación realizada por [Arciniégas S., 2012], este conjunto de partículas sólidas y/o líquidas pueden provenir de distintas fuentes: hollín del combustible diesel, polvo de vías vehiculares, polvo de agricultura, tala y quema de árboles, combustión de leña, incineración de basura y gases emanados de fábricas industriales.

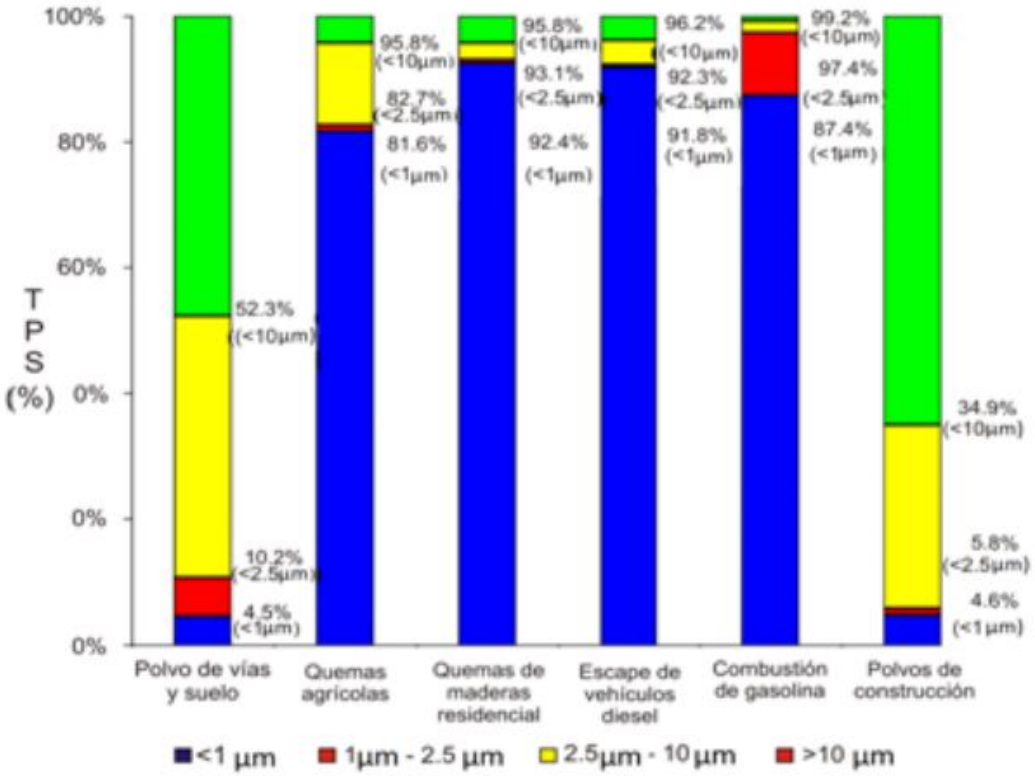


Figura 4.5: Distribución general de tamaño de material particulado dependiendo de distintas fuentes. Fuente: [Arciniégas S., 2012].

Tal como se muestra en la Fig.4.5, estas partículas presentan una variada mezcla de productos químicos, metales, materiales carbonosos, COVS, hidrocarburos aromáticos policíclicos y endotoxinas dependiendo de su fuente. Debido a la complejidad y variabilidad en composición, el MP usualmente es clasificado en base a su diámetro aerodinámico efectivo. De aquí se desprenden dos categorías:

Tabla 4.1: Clasificación del tipo de material particulado que compone la contaminación atmosférica a tratar [Ministerio del Medio Ambiente, sf].

Clasificación del MP	**Longitud de diámetro [µm]**
Grueso	>2.5
Fino	<2.5

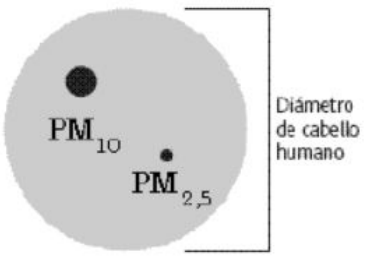


Figura 4.6: Representación ilustrativa del tamaño del MP. Fuente: [Salini C., 2009].

Efectos del material particulado sobre la salud humana.

A continuación, se presenta una tabla resumen de los principales efectos toxicológicos dependiendo del diámetro:

Tabla 4.2: Efectos del MP de dos rangos de tamaño en la salud humana. Fuente: elaboración propia.

Material particulado	**Efectos sobre la salud.**
Grueso (>2.5 [µm])	Efectos en la mortalidad total, relación directa con enfermedades cerebrovasculares y respiratorias a corto y largo plazo. Inflamación de vías respiratorias, alteraciones al sistema nervioso y la coagulación sanguínea, arritmias, contribución a cáncer de pulmón [Vargas R., 2011].
Fino (<2.5 [µm])	Bronquitis, potenciador de enfermedades cerebro y cardiovasculares, incrementos en la mortalidad directa y a largo plazo sobre todo en niños y adultos mayores. Incremento en asma y alergias, disminución de funcionamiento pulmonar, capacidad de dañar cualquier órgano interno debido a su capacidad para penetrar hasta el torrente sanguíneo a través de los alveolos, estrés celular y debilitación del sistema nervioso, infartos de miocardio y aumento de la morbilidad en general [Enviromental Protection Agentcy, sf].

Según la investigación de [Oyarzún G., 2010], se establece que "La exposición a contaminantes del aire puede aumentar la tasa de morbilidad y la tasa de mortalidad como también puede aumentar el número de ingresos hospitalarios de pacientes con síntomas respiratorios y cardiovasculares". Considerando entonces que los niveles de MP pueden tener una incidencia directa en provocar estas enfermedades a la población, se podrá esperar como consecuencia una disminución en la salud local. Estos efectos nocivos son conocidos por las entidades internacionales tal como la OMS, la cual de sus estudios epidemiológicos de cohorte en Estados Unidos dan como resultado aumentos de riesgo de mortalidad de 6 % por cada aumento de 10 [µg/m^3] de MP2,5 para concentraciones promedio anuales y de 1 % de aumento de riesgo de muerte por cada incremento 10 [µg/m^3] para concentraciones promedio diarias e incluso, según la OMS las situaciones de emergencia ambiental consideran un aumento relativo de la mortalidad diaria respecto del valor de la norma de un 3 % para situaciones de alerta, de un 6 % para situaciones de preemergencia y de un 12 % para emergencia [Decreto 12, 2010].

Además, según el estudio realizado por [Bishop et al., 2018] denominado «Hazed and Confused: The Effect of Air Pollution on Dementia» ("Empañados y confundidos: El efecto de la polución en el aire sobre la demencia") comprobó que la exposición prolongada al MP2.5 incluso puede causar demencia, es decir, un incremento de exposición de 1 [µg/m3] en una década supone un incremento de un 1,3 % en el diagnóstico de demencia. Por último, según el estudio realizado por Sánchez, Esther en octubre del año 2018 las personas más sensibles a la contaminación atmosférica son quienes padecen afecciones pulmonares o cardiovasculares crónicas obstructivas, enfermedades tales como la influenza, gripe o asma, al juntarse con los altos niveles de MP en la atmósfera terminan atacando más intensamente a ancianos y los

niños, tal como fue en el caso de Europa, en donde en 41 ciudades en el año 2015 se vivió un fallecimiento prematuro de 422 000 personas por inhalación de estas partículas, el 81 % de los 518 700 muertos por la contaminación atmosférica ese año, todos ellos principalmente niños y ancianos. Para el caso de España, la contaminación causó 38.600 muertes en 2015, una subida respecto a la decada anterior de un 23 % [Sánchez, 2018].

Observando los estudios que dan cuenta de la relación entre niveles de MP y la frecuencia e intensidad de las enfermedades se ha comenzado a analizar más amplia y rigurosamente sus efectos en las últimas décadas por estudios epidemiológicos y asociaciones tales como la EPA y, a pesar de las incertidumbres, se han logrado identificar de mejor manera las formas de impacto, así como también herramientas y correlaciones que permiten evaluar las consecuencias en la salud, mortalidad y pérdidas económicas de los actuales niveles de contaminación atmosférica.

4.2. Contexto local

Para el caso de la ciudad de Santiago de Chile, uno de éstos estudios realizado por José Sánchez, Sebastián Valdés y Bart D.Ostro llamado "los efectos en la salud de la contaminación atmosférica por MP10 en Santiago" determina que existen factores identificables que directamente se relacionan con los efectos que los contaminantes producen en la población y la cantidad de casos esperados: la magnitud o niveles de concentraciones de contaminante, el tiempo de exposición y los hábitos de salud de la propia población.

4.2.1. Fuentes de emisión de MP e historial en la Región Metropolitana.

Según la investigación realizada por [de la Cuadra, 2010], la provincia de la RM se ha caracterizado por medidas históricas graduales e insuficientes por parte de los gobiernos para revertir los problemas que han afectado la calidad de aire. Los problemas no han ocurrido de manera repentina, sino que se han ido acumulando al pasar los años y al incrementarse la cantidad de personas viviendo en la provincia de la RM, lo que se correlaciona con un aumento del sector vehicular y sistema de transporte (con normas y regulaciones deficientes según se menciona en dicha investigación), además la tardía regulación de la quema de combustible, leña domiciliaría y los vacíos legales iniciales en cuanto a regulación de emisiones de carácter industriales agravaban el problema. De todas maneras, si bien ocasionalmente no se cumplen las medidas dictadas por las normas internacionales sobre niveles de MP, ya en la actualidad se ha logrado una significativa mejora en comparación a décadas anteriores:

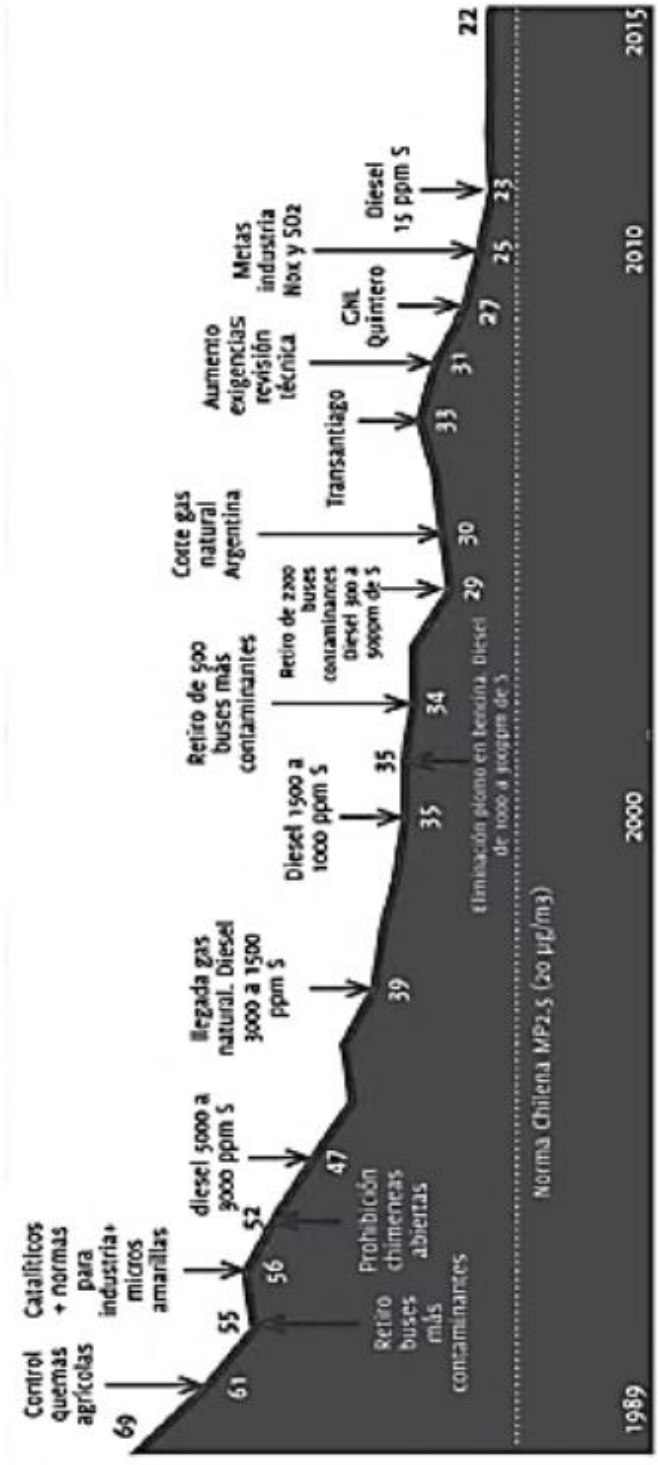


Figura 4.7: Niveles históricos de MP 2.5 en la RM a lo largo de las últimas décadas, considerando la ejecución de distintos proyectos por parte del estado para disminuir éstos niveles de MP. Fuente: [Decreto 31, 2016].

Respecto a las fuentes de emisión de MP en la ciudad de Santiago se consideran comúnmente [O'Ryan and Larraguibel, 2000]: fuentes fijas o puntuales (tales como chimeneas industriales), fuentes fijas superficiales (residenciales, quemas agrícolas, comerciales, entre

otras), fuentes móviles en calles o carreteras (autos particulares, transporte público, camiones, motocicletas, taxis, colectivos, etc), fuentes móviles de rutas externas (tractores agrícolas y aeropuertos) y fuentes de polvo fugitivo (construcciones, preparación de terrenos, demolición y reconstrucción).

De las anteriores, se observa que las principales fuentes de emisión de material particulado de tamaño 2.5 [µm] son la combustión de leña residencial, el sector industrial y el transporte por rutas [Explora, sf]:

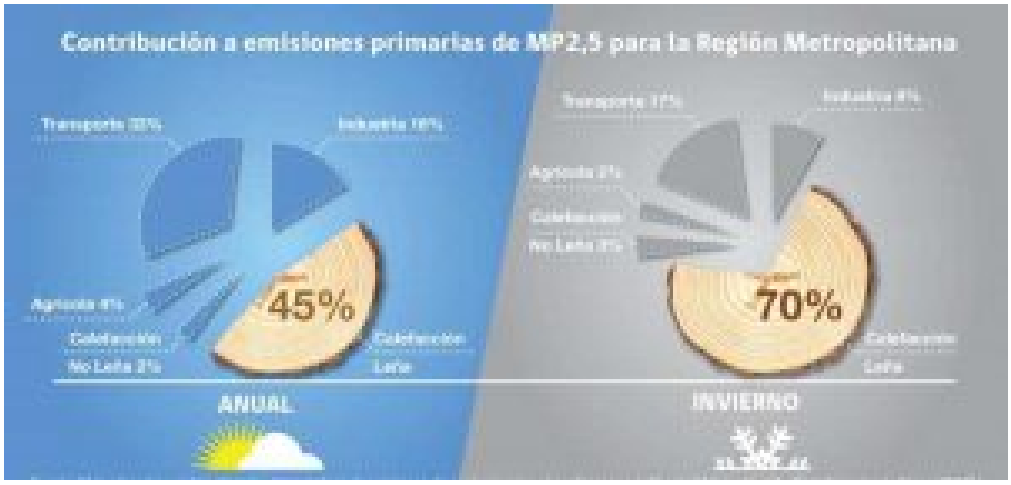


Figura 4.8: Emisiones de MP 2.5 en el año 2013. Fuente: [Explora, sf].

Por contraparte, en lo que respecta al MP10:

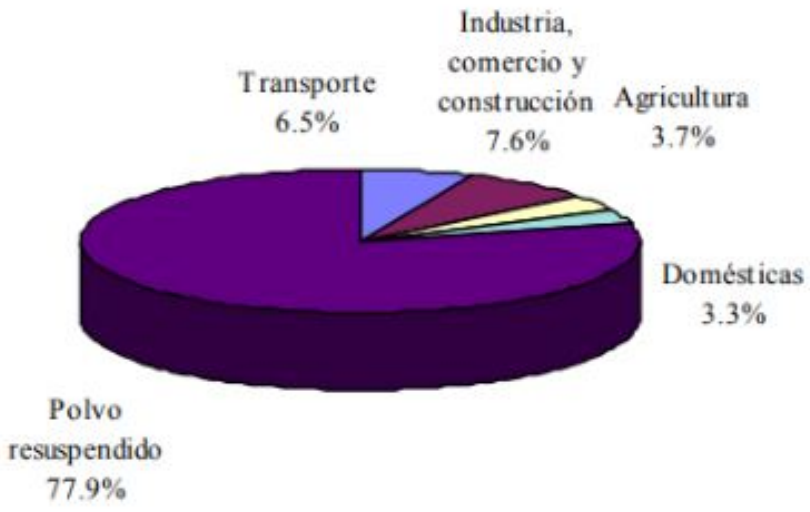


Figura 4.9: Fuentes de emisiones de MP10 en porcentajes, inventario base de 1997, utilizado en decreto actualmente derogado. Fuente: [Decreto 16, 1998].

Por último, una manera de tomar en cuenta el carácter histórico de este problema es

observando la evolución en los registros de los días de superación de la norma nacional, tanto de MP10 como de MP2.5:

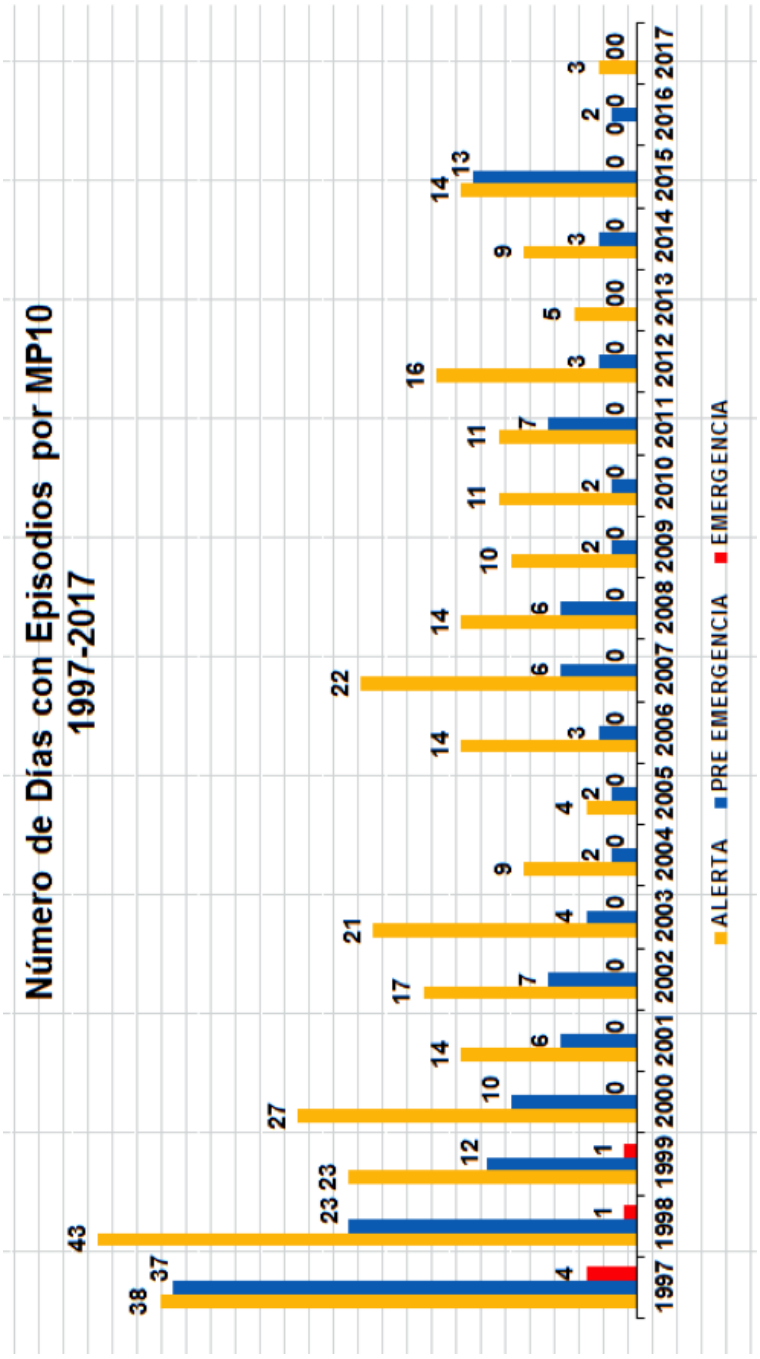


Figura 4.10: Número de días con episodios críticos que superan la norma de MP10, registradas desde el año 1987 hasta el año 2017. Siendo alerta: valores entre 80-109 [µg/m^3] de MP10 promedio en 24 hrs, pre-emergencia: valores entre 110-169 [µg/m^3] de MP10 promedio en 24 hrs y emergencia: 170 [µg/m^3] de MP10 promedo 24 hrs. Fuente: [Secretaría Regional Ministerial, 2018].

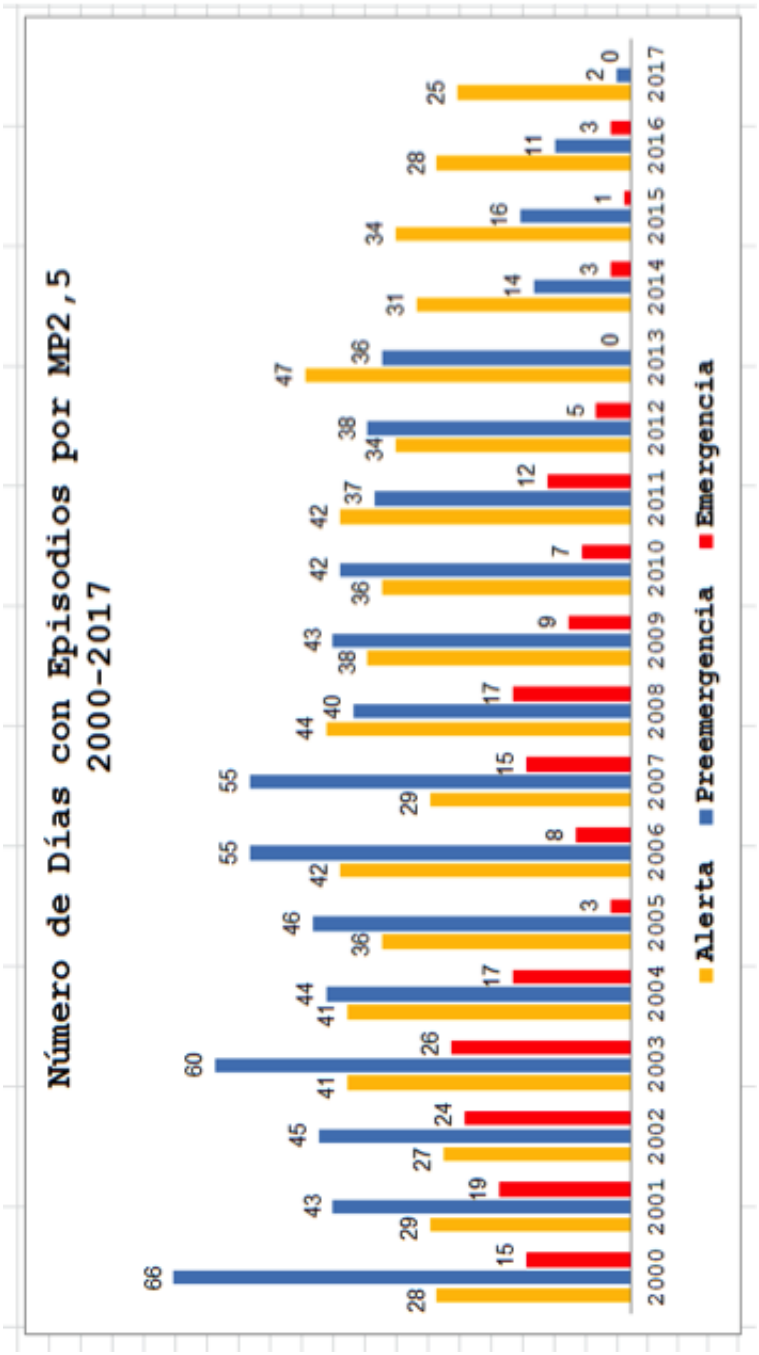


Figura 4.11: Número de días con episodios críticos que superan la norma de MP2.5, registradas desde el año 1987 hasta el año 2017. Siendo alerta: valores entre 80-109 [µg/m^3] de MP10 promedio en 24 hrs, pre-emergencia: valores entre 110-169 [µg/m^3] de MP10 promedio en 24 hrs y emergencia: 170 [µg/m^3] de MP10 promedo 24 hrs. Fuente: [Secretaría Regional Ministerial, 2018].

4.2.2. Factores climático-geográficos contribuyentes a la formación de contaminación atmosférica en Santiago.

Considerando la cantidad de MP producido anualmente y sus fuentes dentro de la región de Santiago, se necesitan considerar también fenómenos meteorológicos y geográficos que agravan la situación anteriormente expuesta:

Fenómeno de subsidencia e inversión térmica.

Se define como inversión térmica al fenómeno meteorológico que se presenta en ciudades o regiones que se encuentran generalmente rodeadas por altas montañas como en geografías tipo valles [Salini C., 2009].

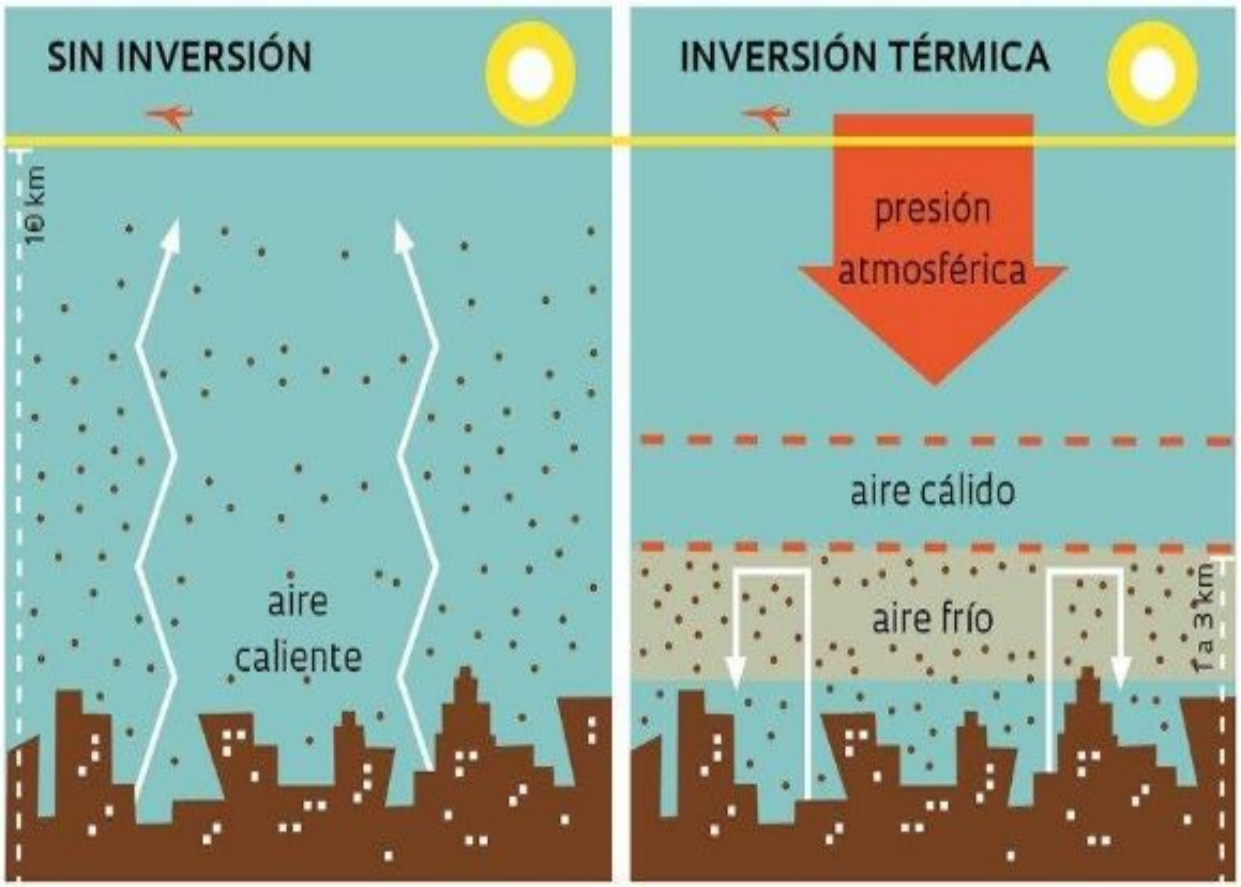


Figura 4.12: Ilustración del fenómeno de inversión térmica en ciudad de La Plata en agosto de 2018. Fuente: [Salini C., 2009].

De numerosos estudios meteorológicos y científicos, se establece que la procedencia de este fenómeno radica en el aumento de la presión en la superficie terrestre, provocada por el anticiclón del océano pacífico.

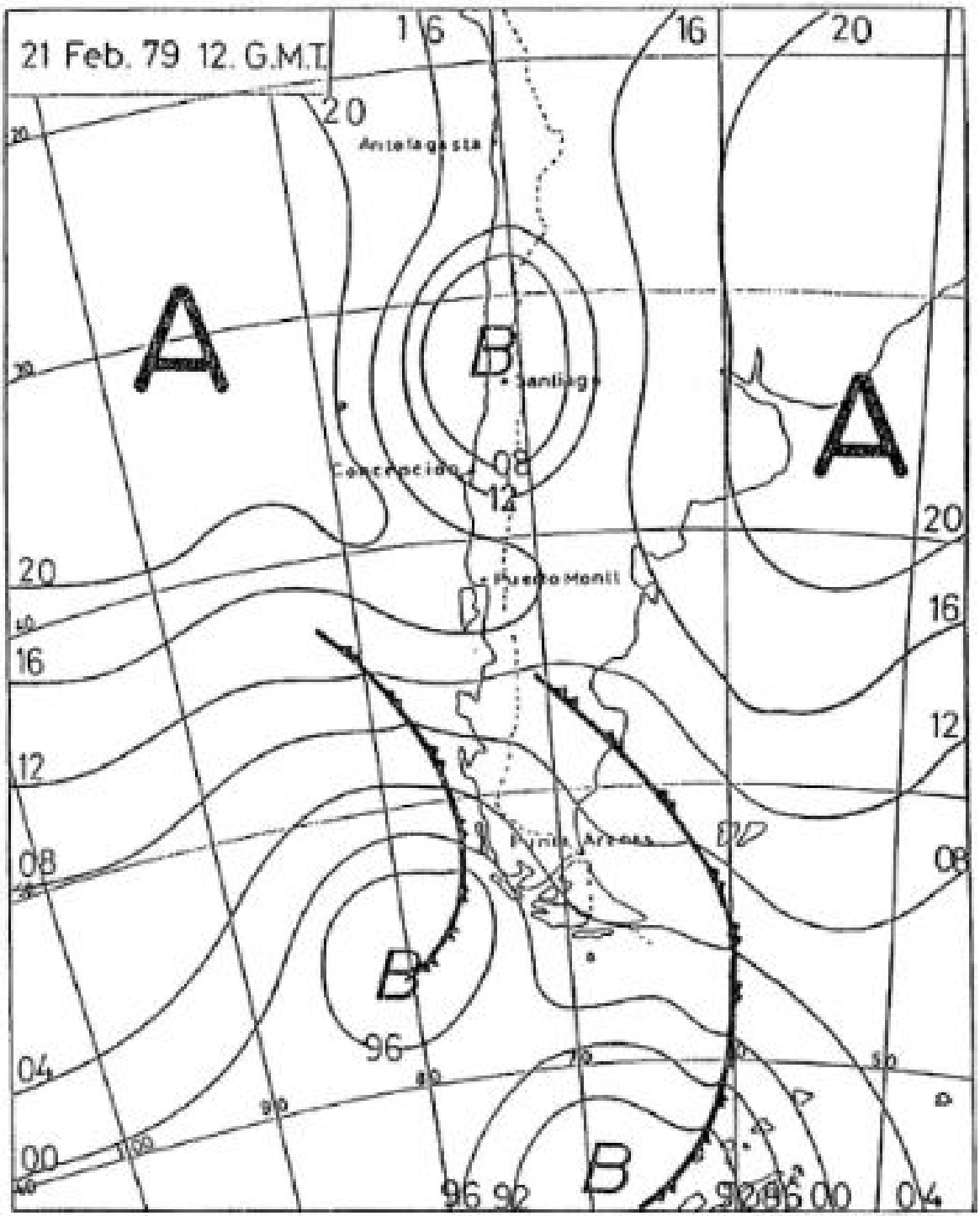


Figura 4.13: Esquema del frente de alta presión provocada por el anticiclón del pacífico, en parte de la zona centro norte de Chile. Fuente: [Salini C., 2009].

Este aumento en la presión afecta mayormente a la zona central del país, aumentando tanto la presión como la temperatura a alturas de entre 700 y 1000 [m] sobre el nivel del mar [de la Cuadra, 2010] lo que finalmente provoca una formación de una especie de "techo" también llamada capa de mezcla que impedirá el ascenso del aire caliente desde el nivel de la

ciudad y por consiguiente evitará la dispersión de las partículas. Este cambio que debería ser la tendencia normal del aire al enfriarse a medida que incrementa la altitud [Salini C., 2009] se ve aún más obstaculizado durante estaciones del año como en invierno, donde la capa de inversión o "techo" baja su altura, alcanzando una altura de aproximadamente 400 metros por sobre la superficie [Ostr et al., 1995].

Condición geográfica tipo cuenca

Otro factor para tomar en consideración es que la ciudad de Santiago se encuentra limitada al este por la cordillera de los Andes, con una altitud promedio de 4500 [m], hacia el oeste se encuentra la cordillera de la costa con una altitud promedio de 1500 [m] y tanto al norte como el sur se encuentran 2 cadenas montañosas de menor tamaño [Saide P., 2008].

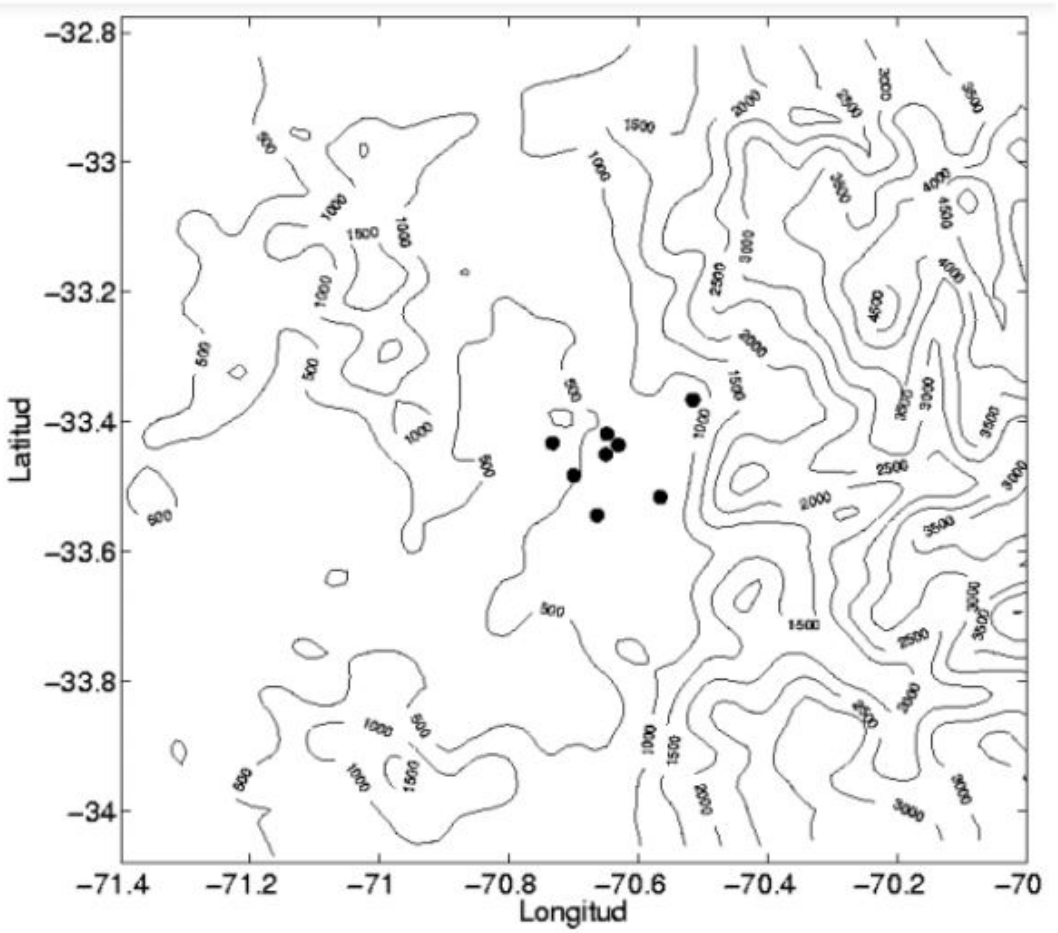


Figura 4.14: Mapa topográfico de la cuenca de Santiago con las cadenas montañosas y sus altitudes, los puntos negros corresponden a las estaciones de monitoreo de la ciudad pertenecientes a la red MACAM. Fuente: [Saide P., 2008]

Para estaciones del año como verano, el patrón de vientos superficiales de dirección suroeste [Saide P., 2008] a pesar de la geografía tipo cuenca, logra ventilar medianamente la RM, ya que hay una mayor velocidad del éstos y menor potencia de la inversión térmica [de la Cuadra, 2010].



Figura 4.15: Representación de la influencia que la geografía tipo cuenca ejerce en el estancamiento del smog en la región Metropolitana en épocas de otoño-invierno. Fuente: [Salini C., 2009].

Sin embargo, para el caso de la época de otoño-invierno (con patrones de viento del suroeste y además del noroeste [Saide P., 2008]), la ventilación moderada no ocurre de la misma manera, por lo que el aire contaminado no solamente queda obstaculizado en su ascenso debido al fenómeno de inversión térmica, sino que además queda "cercado" por la topografía de la cuenca de Santiago (ver Fig. 4.15). Por ejemplo, el caso de sectores industriales como en la zona de Cerrillos y Pudahuel no son fáciles de ventilar, lo que provoca que en éstas zonas finalmente se encuentre sobre todo a ciertas horas del día un nivel alto de aire contaminado. Es justamente en ésta época del año (la llamada "estación del terror") donde las condiciones climáticas agudizan el problema de ventilación de MP en la RM [O'Ryan and Larraguibel, 2000], provocando en numerosas ocasiones días que superan las normas de MP de manera significativa a pesar de que el promedio anual o trimestral del MP no se observe significativamente alto:

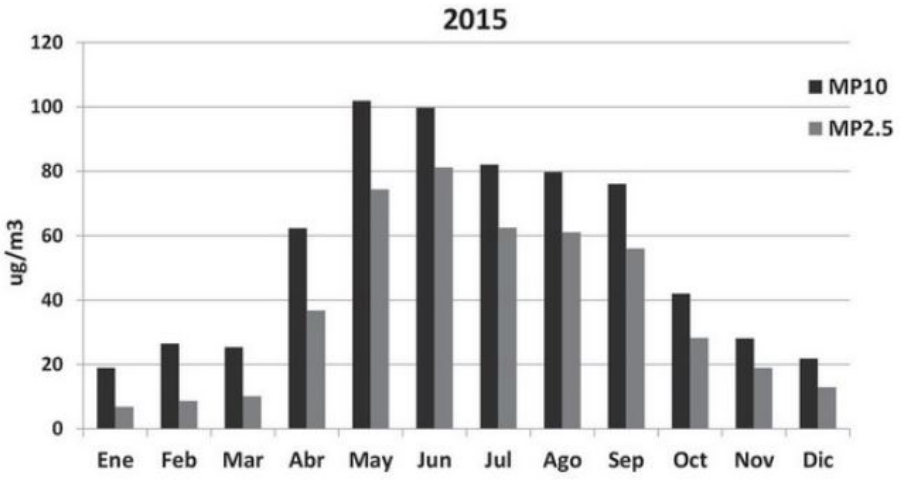


Figura 4.16: Niveles de concentración de MP10 en la provincia de la RM en el año 2015 en función de los meses del año. Fuente: [Decreto 31, 2016].

Esta oscilación en los niveles de MP es posible observarla históricamente, respaldando la teoría estudiada por otros investigadores sobre cómo las estaciones del año y sus características meteorológicas influyen directamente en los niveles de MP.

Junto con el fenómeno de inversión térmica, se ha notado que en resumen, la geografía y clima de Santiago es prácticamente infavorable para la difusión natural de contaminantes atmosféricos [Rutllant and Garreaud, 1995] y de hecho, es posible observar incluso éste comportamiento oscilante de niveles de MP de gráficas de entregadas por la red MACAM-RM para distintas comunas que respaldan estas observaciones (se encuentran 4 ejemplos en Anexo D de tablas de niveles de MP de las comunas de Independencia y La Florida).

Consecuencias para el caso de la provincia de la Región metropolitana: Mortalidad, Morbilidad y Pérdidas Económicas estimadas

La calidad del aire sobretodo en ciertas épocas del año, presenta riesgos directos para la población de la Región Metropolitana. Específicamente según la OMS, el sector que más es afectado o que ha presentado más incidencia en contraer enfermedades tanto respiratorias como cerebrovasculares, y que desgraciadamente concluirán en defunciones y defunciones prematuras es la población anciana o tercera edad mayor a 60 años y en menor medida la población infantil de menores a 4 años y lactantes, para mayor información, (ver anexo B y anexo C).

Se estimó según el quinto reporte del estado del medio ambiente (REMA), que aproximadamente 7.564.857 habitantes de la RM se encontraron expuestos a niveles de MP grueso y fino por sobre el nivel dictado por la norma nacional.

Además, según los datos recogidos del análisis general del impacto económico y social del PPDA en el año 2016, estableció que al año se producen aproximadamente 1.553 muertes por enfermedades cardiovasculares asociadas al MP total en la RM, he incluso sólo considerando los efectos del MP2.5 en la salud de las personas, se reportaron 3.640 casos de mortalidad prematura a largo plazo por enfermedades asociadas a la exposición crónica al MP2.5 en el año 2019 (REMA).

Por otra parte, en lo que respecta a morbilidad[1] la región metropolitana también presenta cifras significativas. Según el quinto REMA, considerando admisiones hospitalarias, visitas a salas de emergencia y días de actividad restringida debido a enfermedades ocasionadas por los niveles altos de MP, se encontraron un total de 4.032.529 casos durante el año 2019.

Un estudio realizado por [Prieto C. et al., 2007] consideró dentro de su investigación la siguiente lista de enfermedades y síntomas relacionada a la contaminación atmosférica de la ciudad de Santiago (específicamente referentes al MP), que afecta directamente a los índices de morbilidad:

[1]Cantidad de personas que se enferman en un lugar y tiempo determinado respecto al total de población [Instituto Nacional del Cáncer, sf]

Tabla 4.3: Principales causas de morbilidad en pacientes menores a 15 años y mayores a 65 años atendidos en el consultorio Albertz en la comuna de Cerrno Navia, año 2007 Fuente: [Prieto C. et al., 2007].

Enfermedad o Sindrome	**Abreviación**
Irritación de ojos y nariz	-
Infecciones respiratorias Agudas	IRA
Exacerbaciones de asma bronquial	-
Enfermedad pulmonar obstructiva crónica	EPOC
Cardiopatías	-
Síndrome Bronquial obstructivo	SBO

En el estudio, se implementaron centros centinela en el consultorio Albertz y en otros consultorios en las demás comunas de la provincia de la RM, para poder registrar todos los casos de pacientes que contemplen estas enfermedades. Se analizaron en total de 92.427 pacientes (12.633 en la clínica Albertz ubicada en la comuna de Cerro Navia y 79.764 en el resto de la provincia de la RM). De aquí se realizaron agrupaciones porcentuales para algunas enfermedades y síndromes, graficándolos como porcentaje de consultas por estas enfermedades respecto al total de la provincia de la RM, todo esto realizado en semanas partiendo desde el 16 de mayo hasta el 31 de diciembre. Los resultados que obtuvieron se pueden contemplar en las siguientes gráficas:

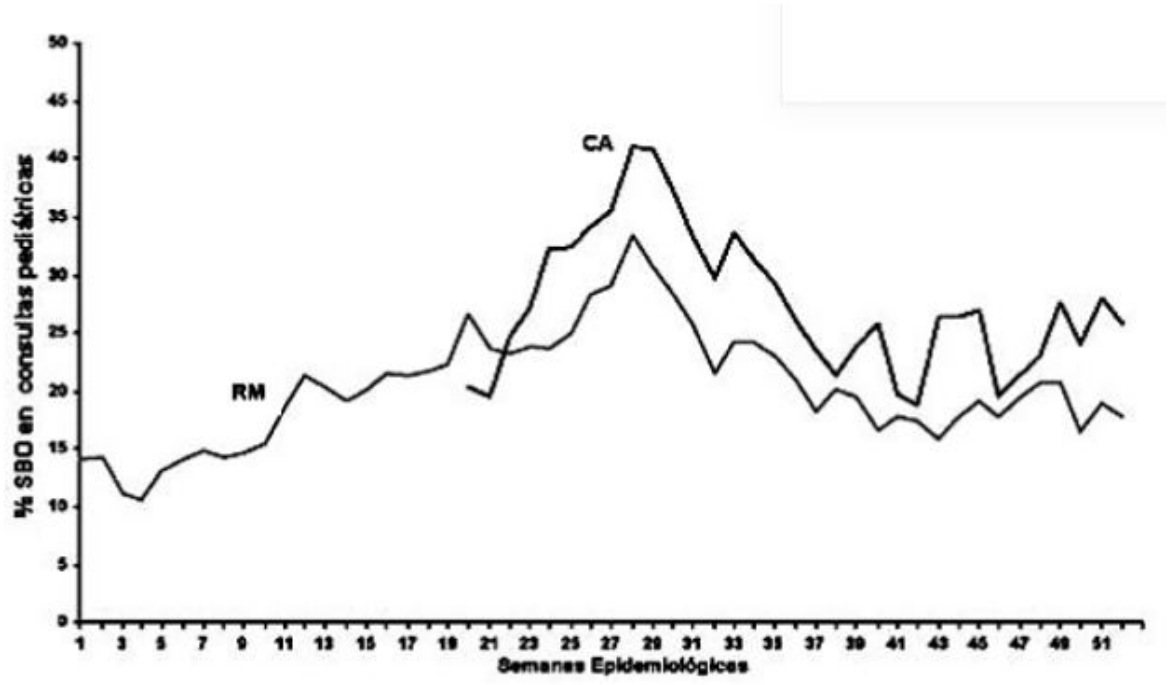


Figura 4.17: Gráfica de % de consultas en niños menores a 15 años atendidas por las clínicas y referidas a las enfermedades tipo SBO, respecto al total de consultas por morbilidad. CA corresponde a Clinica Albertz y RM corresponde a las clinicas del resto de la provincia de la RM. Fuente: [Prieto C. et al., 2007].

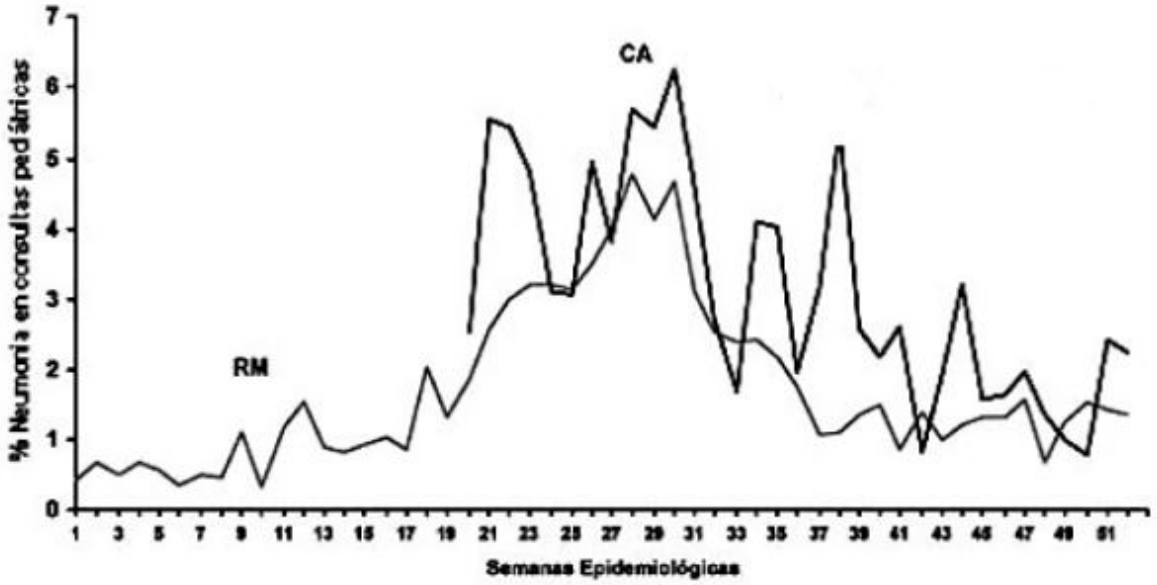


Figura 4.18: Gráfica de % de consultas en niños menores a 15 años atendidas por las clínicas y referidas a las enfermedades tipo neumonía, respecto al total de consultas por morbilidad, CA: Clinica Albertz, RM: El resto de las clínicas en la provincia de la RM. Fuente: [Prieto C. et al., 2007].

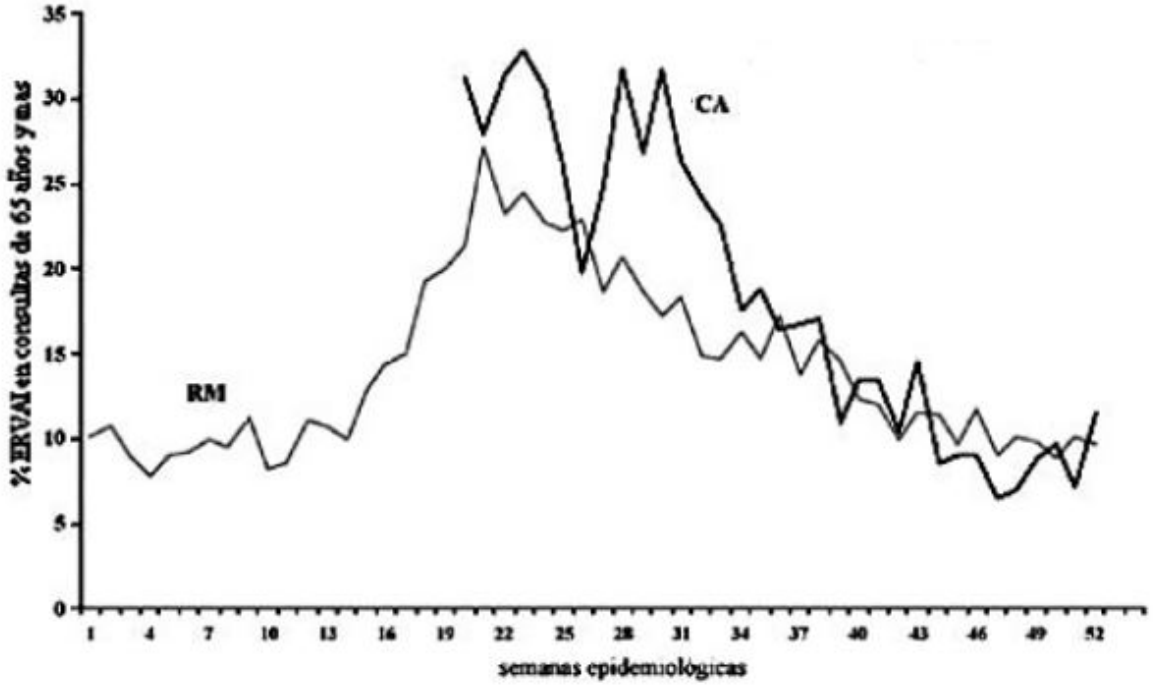


Figura 4.19: Gráfica de % de consultas en adultos mayores a 65 años atendidas por las clínicas y referidas a las enfermedades tipo ERVAI, respecto al total de consultas por morbilidad, CA: Clinica Albertz, RM: El resto de las clínicas en la provincia de la RM. Fuente: [Prieto C. et al., 2007].

Para complementar lo anterior, en otro estudio realizado en la RM por [Oyarzún G., 2010] se presentan específicamente todos los factores que explican mayor susceptibilidad del sistema respiratorio debido a los contaminantes atmosféricos, haciendo énfasis a los sectores poblacionales de infancia y senectud de la Región Metropolitana:

Infancia	Senectud
Menor efectividad de la tos por menor desarrollo de la musculatura respiratoria	Disminución de la fuerza de los músculos inspiratorios y menor efectividad de la tos
Mayor ventilación por mayor frecuencia respiratoria en reposo, aumenta la dosis efectiva de contaminantes	Rigidez torácica
Ausencia de ventilación colateral agrava la obstrucción de vías aéreas periféricas (< 2 mm de diámetro)	Disminución de la respuesta ventilatoria a la hipoxia y a la hipercapnia
Mayor resistencia de las vías aéreas periféricas genera el 50% de la resistencia total al flujo aéreo (en el adulto es < 20%)	Disminución de la percepción de obstrucción bronquial
Menor volumen pulmonar y menor superficie alveolar	Disminución de la superficie alveolar por "enfisema senil"
Mecanismos defensivos no plenamente desarrollados y mayor dificultad en la eliminación de partículas desde las vías aéreas	Disminución de la depuración mucociliar
Mayor exposición a contaminantes atmosféricos, porque los niños pasan mayor parte de su tiempo al aire libre	

Tabla 4.4: Complicaciones de salud y factores específicos que afectan a los grupos poblacionales de infancia y senectud en la provincia de la RM por exposición a MP. Fuente: [Oyarzún G., 2010].

En lo concerniente a las pérdidas económicas, entidades como el Ministerio del Medio Ambiente y el Ministerio de Desarrollo Social y Familia, consideran todas las mortalidades y morbilidades causadas por enfermedades tipo cardiopulmonar, cardiovascular, cerebrovasculares, pulmonares crónicas, neumonía, ataques de asma y bronquitis aguda para el cálculo en las pérdidas económicas según la Tabla 4.5.

Para las pérdidas económicas específicas de la provincia de la RM, la subsecretaría del Ministerio del Medio Ambiente, mediante el indicador ICA8, establece que los beneficios económicos perdidos dentro de la provincia de la RM en el año 2018 debido al incumplimiento de la norma de MP2.5, alcanzan un valor total de 1.482.364.887 pesos chilenos, los cuales provienen de una población afectada de 2.484.807 personas (se consideraron eventos de mortalidad prematura, admisiones hospitalarias, visita a sala de emergencias y restricción de actividad en un rango etario desde los 0 años a los mayores de 65 años).

TIPO DE EFECTO	CAUSA	GRUPO DE EDAD	CASOS (2018)	COSTOS SOCIALES (MM USD) (2018)
MORTALIDAD PREMATURA	Cardiopulmonar	Mayores de 30 años	3.640	2.437
ADMISIONES HOSPITALARIAS	Ataques de asma	Entre 0 y 64 años	130	0,15
	Cardiovasculares	Mayores de 18 años	1.563	3,9
	Pulmonar crónica	Mayores de 18 años	223	0,36
	Neumonía	Mayores de 65 años	984	1,7
VISITA A SALA DE EMERGENCIAS	Bronquitis aguda	Entre 0 y 17 años	88.635	5
RESTRICCIÓN DE ACTIVIDAD	Días de pérdida de trabajo	Entre 18 y 64 años	728.434	27
	Días de actividad restringida	Entre 18 y 64 años	3.212.560	36

Tabla 4.5: Estimación teórica de las pérdidas económicas a nivel país producto de la mortalidad y morbilidad causada por enfermedades respiratorias variadas, año 2018. Fuente: [Ministerio del Medio Ambiente, 2019c].

Explicado lo anterior, existe una metodología para realizar los estudios epidemiológicos en Chile según el MMA que relaciona este tipo de causas del problema (niveles altos de concentración de contaminante), con la consecuencia final (mortalidad y morbilidad en la población expuesta). Santiago al igual que otras ciudades altamente contaminadas puede responder a la siguiente estructura de estudio:

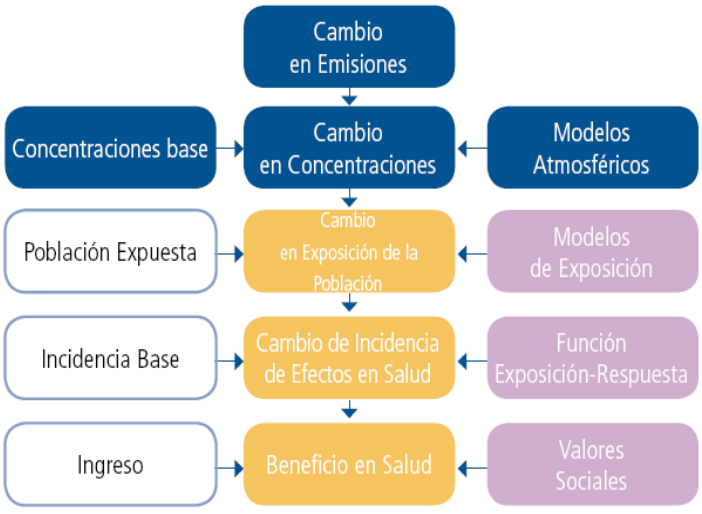


Figura 4.20: Esquema de factores a considerar entre la causa inicio de contaminación atmosférica hasta concluir en la salud de la población expuesta a la contaminación [Departamento de Economía Ambiental, 2013].

Puesto que esta investigación busca evidenciar como parte de sus resultados una consecuencia medible y estimativa sobre los beneficios en la salud humana que se pueden lograr con la implementación del equipo en la comuna seleccionada, es necesario recurrir a herramientas ya utilizadas en otras investigaciones de carácter epidemiológico y socio-económicos.

Según [Sánchez et al., 1998b], se establece que debido a que la calidad de aire no es un bien transable en mercados, no es posible considerar información de precios o relaciones de demanda por niveles o calidad atmosférica directamente. Sin embargo, métodos alternativos que consideren respuestas o reacciones en la población en base a cambios de un determinado componente relacionado con la calidad de aire si son viables a utilizar, siempre y cuando consideren el cambio de niveles del contaminante, la relación entre la salud humana y una valoración monetaria posible a esa consecuencia en la salud humana. Dicho de otra forma:

$$F = f(c, H(c), G[c, H(c)]) \tag{4.1}$$

Donde:
F: Valor que representa el estado de salud de los individuos.
c: Nivel del contaminante analizado.
$H(c)$: Cuantificación de casos con efectos en la salud del individuo dependiendo del nivel de contaminante.
$G[c, H(c)]$: Cuantificación monetaria de los efectos en la salud Hc del individuo al exponerse a los niveles de contaminante c.

Si se planea entonces realizar alguna estrategia tal como un plan de descontaminación atmosférica masivo, implementación de alguna norma de emisiones o nuevas tecnologías tal como éste caso que es la instalación de un equipo en un lugar particular que pueda disminuir los niveles de contaminante, es posible estimar el beneficio de aplicar dicha estrategia comparando los niveles actuales de la situación de estudio y los niveles posteriores a la implementación de la estrategia que busque disminuir los niveles del contaminante atmosférico en cuestión, es decir:

$$\Delta F = f(c^1, H(c^1), G[c^1, H(c^1)]) - f(c^0, H(c^0), G[c^0, H(c^0)]) \tag{4.2}$$

Donde:
ΔF: Variación de los valores de salud de los individuos o variación debido a la implementación de la estrategia.
c^1: Nivel de contaminante después de la implementación de la estrategia.
c^0: Nivel de contaminante antes de la implementación de la estrategia.
$H(c^1)$: Cuantificación de casos con efectos en la salud de los individuos después de la implementación de la estrategia con nivel final de contaminante.
$H(c^0)$: Cuantificación de casos con efectos en la salud de los individuos antes de la implementación de la estrategia con nivel inicial de contaminante.
$G[c^1, H(c^1)]$: Cuantificación monetaria de los casos con efectos en la salud debido a los niveles de contaminante posteriores a la implementación de la estrategia.
$G[c^0, H(c^0)]$: Cuantificación monetaria de los casos con efectos en la salud debido a los niveles de contaminante previos a la implementación de la estrategia.

Para los niveles del contaminante c, distintos estudios epidemiológicos se sirven de variados mecanismos directos o indirectos de cuantificación y predicción de los niveles del contaminante atmosférico de interés para el estudio, generalmente son utilizados modelamientos matemáticos mediante programas en tiempo real y de procesamiento de información metereológica y geográfica. La especificación de cuales están recomendados para estudios realizados en Chile se detalla posteriormente en el ítem de modelamiento predictivo de concentración de contaminantes.

En lo que respecta al valor G, cada país tiene lineamientos y metodologías propias en cuanto a la valoración monetaria de padecer afecciones atribuidas a los niveles de contaminante c. Esta valoración también se detallará posteriormente en el capítulo de estudio económico: método de cálculo para estimación monetaria de beneficio.

4.2.3. Funciones dosis-respuesta y su relación con el material particulado y la salud humana.

Existen numerosos estudios en la literatura científica que establecen una relación estadística directa entre los efectos reales en la salud de la población y la variación de concentraciones de material particulado tales como variados estudios epidemiológicos realizados por la EPA o [Ostro, 1998], y entre varias observaciones, se señala que esta relación causa-efecto depende también tanto del lugar geográfico donde se encuentra la población como del tiempo de experimentación al que se somete la población estudiada. Para el valor $H(c)$ una de las herramientas para cuantificar ésta la relación son las llamadas funciones dosis-respuesta (FDR) las cuales son funciones matemáticas provenientes generalmente de estudios epidemiológicos con apoyo de estudios humanos clínicos y literatura de toxicología animal [Ostro, 1996] que ayudan a estimar el impacto cuantitativo y efectos en la salud en los humanos dependiendo de la variación de concentración de contaminantes a los cuales esté expuesta la población. Existen a su vez dos enfoques reconocidos para las FDR:

- Funciones dosis-respuesta que correlacionan el cambio de tasas de mortalidad o morbilidad en un área geográfica fija a través del tiempo con los cambios de concentraciones ambientales y reciben el nombre de funciones dosis-respuesta con enfoque de series de tiempo.
- Funciones dosis-respuesta que comparan tasas de mortalidad o morbilidad en distintas áreas geográficas en un instante de tiempo fijo con la variación de contaminante y que son llamadas funciones dosis-respuesta de corte transversal.

Adicionalmente, si bien todas las ciudades altamente urbanizadas poseen en algún grado la problemática respecto a la contaminación atmosférica, no todas cuentan con las mismas condiciones tanto geográficas como atmosféricas e incluso de carácter endémico y poblacional. Según [Ostro, 1994], este tipo de enfoque mediante utilización de funciones dosis-respuesta inicialmente se realizó en países como Estados Unidos e Inglaterra. Al encontrar que la estimación mediante estas funciones logró mostrar una fuerte correlación entre tasas de mortalidad y morbilidad reales en estos países y la variación en los niveles de contaminante, se fue profundizando la investigación por parte la comunidad científica y epidemiológica para probar la viabilidad de usar estas relaciones en otras zonas geográficas que presenten similitudes demográficas y geográficas a las primeras FDR construidas.

Hasta el día de hoy se continúan perfeccionando y corrigiendo las FDR y sus parámetros para que sean correlacionalmente más acordes a cada sector geográfico en el cual se desee realizar cada estudio epidemiológico. Por eso mismo, los efectos que éstas ayudan a determinar aún siguen siendo acotados, es decir, estiman el impacto en enfermedades directas y a corto plazo, siendo por ejemplo las funciones dosis-respuesta de enfermedades crónicas a largo plazo un campo complejo y aún no suficientemente confiable para establecer diagnósticos, por lo que mayores investigaciones en esta área ayudarían a mejorar la predicción de resultados. Añadiendo a lo anterior, también es recomendado que las FDR se construyan considerando el comportamiento intrínseco del sector poblacional de estudio pero dependiendo del caso, se pueden considerar la utilización de FDR adaptadas desde otras regiones geográficas.

Para ésta investigación, se utilizarán FDR con enfoque de serie de tiempo según lo recomendado por el estudio [Sánchez et al., 1998a] ya que éstas poseen la ventaja de minimizar los problemas de variables tales como hábitos tabáquicos, alimenticios, exposición al aire libre, acceso a la salud, entre otras, y que sin embargo, para las FDR con enfoque de corte transversal serían de vital importancia debido a la variabilidad de dichos factores según el sector o estrato socio-geográfico en la cual se distribuye la población.

Dicho esto, una función dosis-respuesta con enfoque de serie de tiempo posee la siguiente estructura:

$$\Delta H_{ij} = \beta_{ij} \cdot Pob_{ij} \cdot IR_{ij} \cdot \Delta Cij \tag{4.3}$$

Donde:
ΔH_{ij}: Cambio en el número probable de individuos con riesgo en salud debido al efecto i en el área de la población expuesta j.
β_{ij}: Pendiente de la función dosis respuesta o coeficiente de riesgo unitario del efecto i en la población de la zona j.
Pob_{ij}:Población expuesta al riesgo de ser afectada por el efecto i del contaminante en la zona j donde se encuentran.
IR_{ij}: Tasa de incidencia de la afección i en la Población expuesta j.
ΔCij: Cambio en la concentración atmosférica del contaminante i en la zona j.

Antes de proseguir con las funciones dosis-respuesta que se utilizarán en ésta investigación, es importante tener en cuenta las consideraciones y limitaciones que éstas poseen, las cuales han sido notificadas en el estudio [Sánchez et al., 1998a]:

- Tal como se mencionó antes, las funciones dosis respuesta que se utilizarán y las que se encuentran en literatura sólo poseen validez para estimar efectos a corto e inmediato plazo, por lo que efectos secundarios crónicos a largo plazo no son posibles de estimar de manera muy precisa, existen funciones para estos efectos, pero son complejas, poco estudiadas y con alta incertidumbre.
- Las funciones de MP10 que se utilizarán, fueron creadas estudiando sectores y poblaciones de Santiago de Chile, por lo tanto, las FDR consideran el supuesto de que factores tales como acceso a la salud, hábitos de vida (alimenticios, deporte, consumo de cigarro, etc) no son significativamente distintos desde que se construyeron hasta la fecha. En este caso, el estudio [Ostro, 1996] demostró que estas suposiciones utilizadas demostraron no entregar resultados significativamente distintos a los valores reales.

- Las funciones dosis-respuesta se pueden trabajar de forma lineal para cualquier concentración de contaminante a evaluar, por lo que no se consideran comportamientos distintos a concentraciones excesivamente bajas o altas. Esto es un factor interesante a analizar, debido a que, según variados estudios epidemiológicos de la EPA, pueden existir compuestos como sulfatos que no obedezcan comportamientos lineales de salud en los umbrales de las funciones dosis-respuesta, pero para el caso del material particulado, estudios como [Sánchez et al., 1998a] establecieron que las FDR siguen siendo lo suficientemente precisas cuando se trabaja en los umbrales bajos y altos de contaminación por MP.
- Para el caso de la función dosis-respuesta del MP, se considera una suposición de composición constante, sin embargo, es bien sabido que la composición y la cantidad del material particulado no es uniforme en todos los sectores de Santiago, su composición química depende tal como se presentó anteriormente, del tipo de fuente de emisión.
- Estas funciones dosis-respuesta no consideran interacciones entre distintos contaminantes, sólo considera la variación de MP y su relación con los casos las afecciones, siendo que, en la realidad, los compuestos presentes en la atmósfera pueden interactuar entre ellos, tanto afuera, como dentro del cuerpo humano, "cooperando" entre ellos para empeorar los efectos en la salud final.
- Las funciones dosis-respuesta no prueban una causalidad, sin embargo, duplicar estos análisis epidemiológicos en distintos estudios ayudan a entregar un rango de los efectos en la salud, los cuales sí aclararían mejor dicha causalidad. Según el estudio [Ostro, 1996] y apoyado con entidades como el EPA o la OMS, se recomienda trabajar con rangos de efectos o niveles de probabilidad de padecer ciertas afecciones.
- Según lo anterior, los rangos o niveles mencionados en el estudio no pretenden representar cotas mínimas o máximas, sino que, según la investigación, representan rangos donde es más probable encontrar los valores de los efectos en la salud (Niveles bajo, medio o normal y alto, de las cuales, el nivel medio es donde es más probable encontrar los casos con afecciones a la salud).

Capítulo 5

Definición y propuesta de proyecto

Para el presente trabajo, se realiza un estudio de prefactibilidad técnico-económica para la posible implementación de uno de los variados equipos de mitigación de MP especializado en zonas públicas.

Como se expuso anteriormente, los problemas en los niveles de MP en la Región Metropolitana de Santiago están aún distantes de ser permanentemente resueltos y puede resultar interesante estudiar métodos directos de tratamiento de MP que puedan ayudar al programa de compensación de emisiones del PPDA.

Debido a lo anterior, este trabajo plantea ofrecer una alternativa reducida pero directa en lo que respecta al problema de la calidad del aire en Santiago de Chile. Según la misión y visión del Ministerio del Medio Ambiente: "Liderar el desarrollo sustentable, a través de la generación de políticas públicas y regulaciones eficientes, promoviendo buenas prácticas y mejorando la educación ambiental ciudadana" y "Alcanzar el desarrollo sustentable para el país con el objeto de mejorar la calidad de vida de los chilenos, tanto de ésta generación como de futuras".

Considerando lo anterior es que proyectos como éste si bien no solucionan el problema inmediata y completamente, si son promotores de éstos objetivos anteriormente mencionados, dando una oportunidad a nuevas tecnologías internacionales innovadoras y ecológicas para ponerse a prueba en países como Chile.

Dicho esto, no solamente el ministerio determinó el problema de contaminación atmosférica como prioritario, sino que también se han realizado encuestas ciudadanas sobre cuáles son las principales problemáticas medioambientales de las cuales se debería preocupar el Ministerio de Medio Ambiente y la apreciación a lo largo de los años no varía significativamente, siendo la contaminación atmosférica el problema medioambiental principalmente reconocido:



Figura 5.1: Esquema de los resultados de encuesta realizada a la población nacional sobre los principales problemas medioambientales que se deberían solucionar [Ministerio del Medio Ambiente, 2018].

Por último, existen indicadores internacionales que, como consecuencia de optar por este tipo de proyectos, se pueden ver relativamente favorecidos ya que apuntan al impulso y apoyo para solucionar problemas de carácter socio-ambiental.

Uno de estos indicadores considera factores como vida larga y saludable y estándares de vida decente: el IDH, y otro de ellos es el indicador de sustentabilidad ambiental ESI creado por la OCDE, los cuales pueden verse posiblemente mejorados ya que, tal como lo consideran estos índices, se busca mejorar el bienestar de la población y el medioambiente, apuntando a un mayor cuidado de ella desarrollando una política de sustentabilidad ambiental y tecnológica a nivel país.

Considerando lo anterior se realiza la siguiente propuesta: Dentro de todas las tecnologías actualmente existentes en el mercado que atacan directamente al problema de contaminación atmosférica anteriormente discutido, se sugiere una tecnología que ha dado muy buenos resultados a nivel mundial en ciudades similares a la Región Metropolitana en cuanto a niveles de contaminación.

Este equipamiento es conocido como Smog Free Tower® o torre de captación de smog (SFT), creada por la empresa Roosegaarde Studios en conjunto con el instituto Environmental Nano Solutions (ENS), la Universidad Técnica Eindhoven de Países Bajos y liderada por su creador Daan Roosegaarde.

La implementación de este equipo busca disminuir dentro de una zona de la Región Metropolitana los niveles de MP. Específicamente busca reducir la concentración de MP a la que se exponen las personas creando un área o "burbuja" de aire purificado. La especificación y los criterios de la zona geográfica escogida dentro de la Región Metropolitana se detallará posteriormente.

5.1. Especificaciones técnicas

En lo que respecta al equipo, éste consiste en una torre "aspiradora de smog". Tiene una altura de 7 [m] de alto por 3.5 [m] de ancho, posee un sistema modular y utiliza una tecnología patentada de ionización positiva para producir aire libre de smog en espacios públicos amplios, como sectores urbanos y plazas públicas.

Funciona con energía amigable con el medioambiente ("electricidad verde") y es capaz de limpiar hasta 30.000 [m^3] de aire por hora con un gasto de 1.170 [W] en un radio de entre 10 a 40 [m] a la redonda (Ver información de ficha técnica en anexo E).



Figura 5.2: Equipo "Smog Free Tower" implementado en la ciudad de Rotterdam en 2015. Fuente: [Studio Roosegaarde, 2015].



Figura 5.3: Equipo “Smog Free Tower” implementado en parque de Kraków, Polonia. Fuente: [Blackburn, 2018].



Figura 5.4: Equipo “Smog Free Tower” construido e implementado en Beijing, China. Fuente: [India - ICT, sf].

Su implementación y operación se ha realizado en lugares como parques en distintas ciudades altamente contaminadas alrededor del mundo. Además, luego de ser capturado el MP,

Daan Roosegaarde creó un subproducto llamado "Smog free ring", el cual consta de la revalorización del MP capturado y transformado en un anillo que contiene el MP capturado en un volumen de aire purificado de 1000 [m^3], dejando éste anillo como un "souvenir" para las personas que han colaborado con el proyecto, ya que éste proyecto inicialmente optó por la estrategia de financiamiento de "crowdfunding" o financiamiento colectivo de personas, con lo cual lograron obtener inicialmente la suma de 113.153 euros según la empresa.



Figura 5.5: Joya creada utilizando el smog recolectado de 1.000 [m^3] de aire tratado; el anillo, llamado "smog free ring", es usado por la empresa para seguir promoviendo la tecnología y el crowdfunding. Fuente: [Studio Roosegaarde, 2015].

5.2. Resultados del equipo en otros países

Ésta nueva tecnología se ha implementado en varias localidades tales como Cracovia, Polonia, Paises bajos, Rotterdam, Korea del Sur y ciudades de China tales como Beijing, Tianjin y Dalian (ver noticia de implementación en China en anexo F), siendo su primera implementación en el año 2015 en la ciudad de Rotterdam y considerando además expandirse en el futuro a ciudades como Los Ángeles, Ciudad de México y París, entre otras [Studio Roosegaarde, 2015]. Según la información facilitada en el sitio web de la empresa Roosegaarde, el equipo ha conseguido un gran reconocimiento a nivel mundial, obteniendo premios y reconocimiento de entidades tales como "Premiación de La ética de los Negocios", "Gran premio por la sustentabilidad", "Europa 40 bajo 40", "Premio por diseños que educan", "Premio de oro por diseño para Asia", "Premio Platino A'Design", y "Premio Alemán por excelencia en diseño de producto".

En cuanto a los primeros resultados, según el reporte de Gabriella Penkova realizado en el año 2016 llamado "Smog Free Project" en un período de una semana, la torre mostró purificar el aire de esa área en alrededor entre un 70 % a un 75 %, recolectando 3.500 cubos de MP por día y entregando finalmente un volumen de casi 3.500.000 [m^3] de aire purificado.

En el caso de China, un estudio realizado por [ENS, 2017], implementada en el estadio Minyuan en la ciudad de Tianjin, China, presentó una reducción de sobre un 50 % para el MP2.5 y sobre 71 % para el MP10 en dicha área, información respaldada por modelamientos y simulaciones computacionales de fluido dinámica (CFD) realizados por profesionales de la universidad Eindhoven de Tecnología en Países Bajos y por el instituto holandés "Environmental Nano Solutions" (ENS).



Figura 5.6: Representación 3D de la implementación de la SFT por la empresa Roosegaarde Studios realizada en el estadio Minyuan en la ciduad de Tianjin, China.

Para detallar mejor su funcionamiento, la torre utiliza un sistema de ventilación radial en la parte superior, lo que captura las partículas de MP inferiores a 15[µm], dirigiéndolas gradualmente a la parte inferior de la torre. Según lo reportado por la investigación de ENS, a lo largo del proceso, las partículas de MP son cargadas positivamente debido a la exposición de un contraelectrodo, lo que provoca que el aire se vuelva conductivo (descargas corona). Posterior a eso, las partículas colisionan con otros átomos y moléculas y son direccionadas a un plato colector de carga neutra. El aire purificado finalmente es expulsado por la parte central de la torre, en una cobertura de 360 grados formando finalmente una "burbuja" de aire libre de smog en un perímetro desde 10 a 40 [m] a la redonda dependiendo de las condiciones de velocidad de aire del sector. Según la empresa, en éste proceso, a diferencia de las tecnologías de ionización negativa, la torre produce una mínima cantidad de ozono (según ENS, mucho menor respecto al límite de las normas legales). La recolección de MP capturado se realiza 1 vez por semana, el cual es finalmente utilizado para la creación de las joyas anteriormente detalladas.

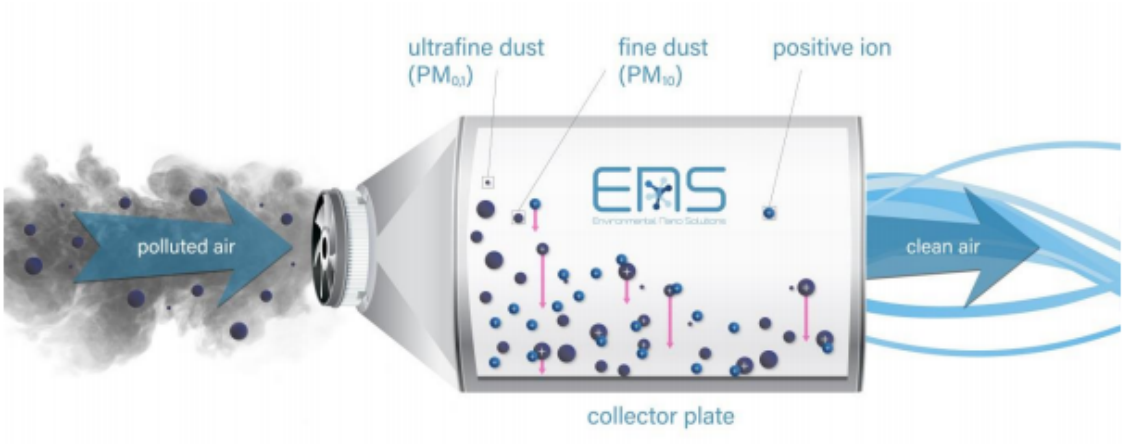
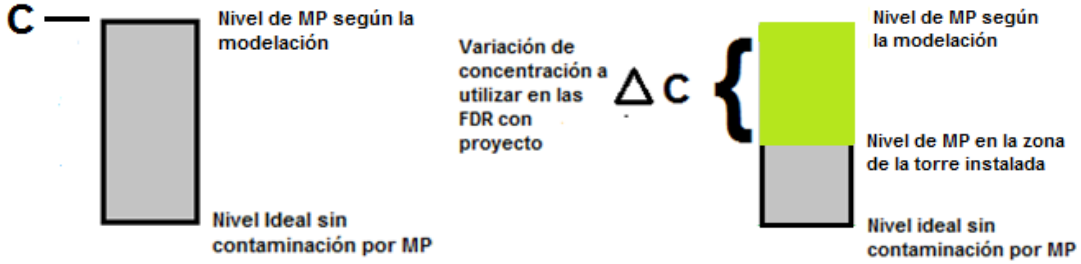


Figura 5.7: Fenomenología de la atracción de partículas suspendidas mediante Ionización. Fuente: [ENS, 2017].

Para mayores detalles técnicos de la SFT, véase anexo E.

Considerando lo anterior, el efecto que logra la torre al estar operando en zonas públicas dentro de ciudades, en cuanto a lo referente a contaminación atmosférica por MP se puede ilustrar a grandes rasgos de la siguiente forma:



(a) Esquema del nivel de MP que normalmente se espera en la zona.

(b) Esquema del nivel de MP que se espera en la zona luego de implementar el equipo.

Figura 5.8: Simplificación de lo que se espera que la torre logre al aplicarse en el área respecto a los niveles de MP. Fuente: elaboración propia.

5.3. Criterios y especificación del sector geográfico a tratar

Este proyecto, el cual hace un énfasis más en lograr un beneficio social y ayuda a la comunidad que en un beneficio o retorno monetario directo, está pensado para ofrecerse como mecanismo de compensación de emisiones para el MMA.

Dicho esto, se ha demostrado que el equipo SFT es capaz de implementarse en sectores altamente contaminados por MP como lo han sido en parques en ciudades de China, sin embargo, su alcance y eficiencia es limitada, en un clima estable, la torre tiene un radio de alcance de captación del MP limitado de entre 10 a 40 [m]. Debido a las consideraciones

anteriores se debe estudiar la localización de la torre en un sector hipotético clave dentro de la Región Metropolitana el cual: contemple un sector usualmente crítico en los niveles de MP, maximice el impacto para las personas del sector poblacional de riesgo objetivo y mantenga su eficiencia de captación de MP para disminuir los altos niveles de contaminación en éste mismo sector. Para tomar esta decisión e identificar el sector más apto para su instalación, se considerarán entonces los siguientes criterios:

Historial de mayores niveles de MP por comuna dentro de la provincia de la RM.

Como primer criterio se considerarán las comunas con mayor historial de sufrir altos niveles de MP.

Se entiende por historial de niveles de MP a los valores promedio, diario y anual que han presentado en los últimos años las comunas de la región metropolitana de MP. Estos datos han sido registrados por la red MACAM-RM, procesados y subidos al sistema de información nacional de calidad del aire (SINCA) para libre información por parte de la ciudadanía.

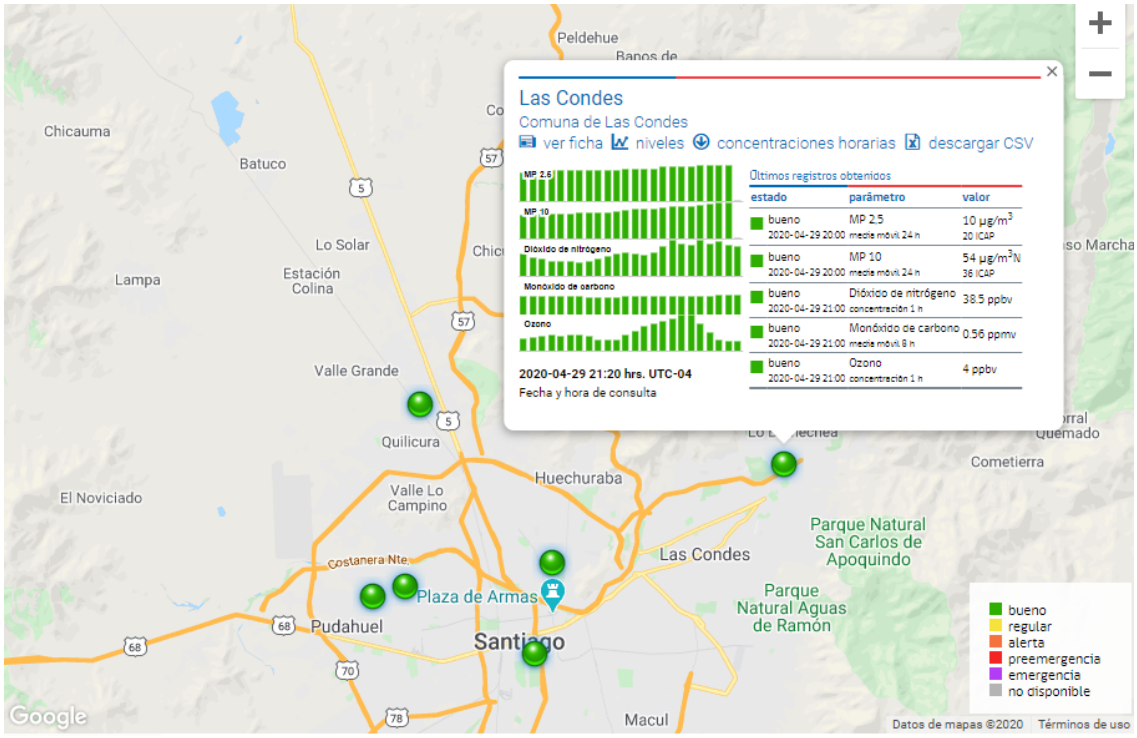


Figura 5.9: Plataforma online SINCA. Fuente: [Ministerio del Medio Ambiente, 2015b].

De aquí, se pueden encontrar las comunas con mayores niveles de MP10 y MP2.5 considerando los promedios aritméticos desde primeros registros del SINCA que correspondan a valores validados hasta la fecha. No se considerarán valores preliminares o no validados por el sistema ni tampoco las comunas que no posean una estación de monitoreo de MP:

Tabla 5.1: Promedios históricos de MP10 para distintas comunas de la provincia de la RM asociadas a la red MACAM-RM elaborada con datos obtenidos de SINCA. Fuente: [Ministerio del Medio Ambiente, 2015b].

Ubicación de Estación	**Promedio aritmético de [µg/m^3]**	**Desviación estándar**	**Fecha registro de datos**
Puente alto	61,61	39,36	01-01-2009/31-03-2019
El Bosque	76,81	56,80	04-04-1997/31-03-2019
La Florida	76,23	56,31	27-05-1997/31-03-2019
Parque O'Higgins	73,09	53,70	01-04-1997/26-03-2019
Pudahuel	73,53	62,45	03-04-1997/31-03-2019
Cerro Navia	70,30	59,30	26-03-2001/30-03-2019
Independencia	69,15	45,13	01-04-1997/12-04-2019
Las Condes	54,65	37,87	23-04-1997/31-03-2019
Quilicura	62,61	38,51	04-02-2016/26-03-2019

Tabla 5.2: Promedios históricos de MP2.5 para distintas comunas de la provincia de la RM asociadas a la red MACAM-RM elaborada con datos obtenidos de SINCA. Fuente: [Ministerio del Medio Ambiente, 2015b].

Ubicación de Estación	**Promedio aritmético de [µg/m^3]**	**Desviación estándar**	**Fecha registro de datos**
Puente alto	25,86	18,58	01-01-2009/31-12-2019
El Bosque	30,74	56,83	04-04-1997/31-12-2019
La Florida	30,53	22,37	01-01-2000/31-12-2019
Parque O'Higgins	30,70	24,25	01-01-2000/31-12-2019
Pudahuel	30,55	30,27	01-01-2000/31-12-2019
Cerro Navia	30,66	31,08	09-05-2008/31-12-2019
Independencia	26,92	17,73	08-05-2008/31-12-2019
Las Condes	23,71	16,22	01-01-2000/31-12-2019
Quilicura	26,47	20,10	21-04-2016/31-12-2019

Observando los datos históricos se puede apreciar que para el caso de MP10, las comunas que presentan niveles más altos desde que se implementó la plataforma SINCA en conjunto con la red MACAM-RM son La Florida, El Bosque, Parque O'higgins, Pudahuel y Cerro Navia, y para el caso de MP2.5 también correspondieron a las mismas comunas.

Cantidad y distribución comunal de población de riesgo

Para el segundo criterio, se considerará la distribución y ubicación de la población que presenta mayor probabilidad de contraer enfermedades relacionadas con el MP y con posible mortalidad inmediata o a largo plazo, tal como se expuso previamente en la sección de efectos del MP en la salud humana corresponderían a los adultos mayores a 60 años y los menores a 4 años (revisar tabla de grupo de defunciones en anexo B).

De los datos entregados por el último censo en el año 2017 se consideró la población infante y lactante menor a 4 años, y en la población de adulto mayor y senil, se consideraron los mayores a 60 años, luego se tiene la información se presenta en la siguiente gráfica:



Figura 5.10: Población menor a 4 años en la provincia de la RM especificada por comunas, datos obtenidos de Censo 2017. Fuente: elaboración propia.

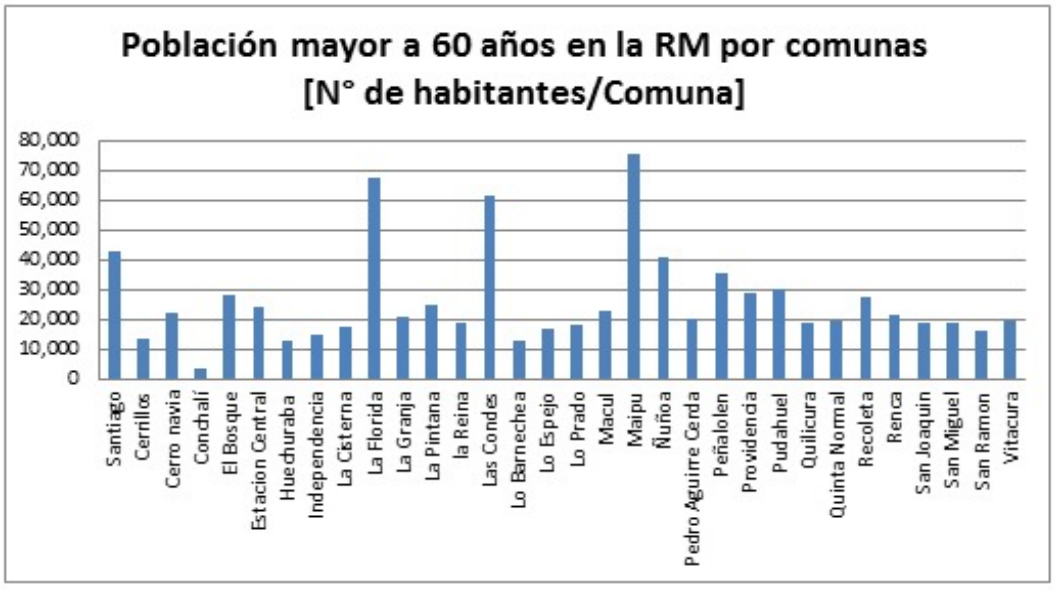


Figura 5.11: Población mayor a 60 años en la provincia de la RM especificada por comunas, datos obtenidos de Censo 2017. Fuente: elaboración propia.

De las Fig. 5.10 y Fig. 5.11 información entregada por el Censo en el año 2017, se puede observar que las primeras 5 comunas con mayor población de riesgo son, para el caso de los menores a 4 años: las comunas de Santiago, La Florida, Las Condes, Pudahuel, y Maipú,

mientras que para el caso de los mayores a 60 años: las comunas de Santiago, La Florida, Las Condes, Ñuñoa y Maipú. Por otra parte, de debe analizar la densidad poblacional de cada comuna:

Tabla 5.3: Densidad poblacional para sectores de la población con mayor riesgo a enfermedades debido a la contaminación atmosférica, considerando las comunas censadas en el año 2016, Fuente: elaboración propia.

Comunas de la RM	**D. pob. de 0 a 4 años [hab/km^2]**	**D. pob. de 60 años o más [hab/km^2]**
Santiago	888,7	1841,9
Cerrillos	263,7	628,2
Cerro Navia	807,3	2034,2
Conchalí	746,6	330,2
El Bosque	757,0	1988,7
Estación Central	583,1	1599,9
Huechuraba	164,9	285,8
Independencia	943,9	2157,6
La Cisterna	538,2	1745,2
La Florida	317,1	965,0
La Granja	764,6	2075,4
La Pintana	456,9	810,9
la Reina	223,9	815,3
Las Condes	163,6	622,7
Lo Barnechea	6,8	12,3
Lo Espejo	935,0	2384,1
Lo Prado	867,2	2746,1
Macul	522,4	1787,4
Maipu	237,7	555,8
Ñuñoa	719,8	2406,4
Pedro Aguirre Cerda	603,4	2037,5
Peñalolen	282,8	660,6
Providencia	536,5	2014,7
Pudahuel	81,3	151,3
Quilicura	259,5	326,3
Quinta Normal	532,3	1566,5
Recoleta	611,3	1709,3
Renca	451,5	891,9
San Joaquin	576,7	1947,6
San Miguel	673,9	1874,9
San Ramon	779,6	2282,7
Vitacura	202,5	689,2

Esto es debido a que es importante considerar la densidad poblacional como otro criterio, ya que tal como se presentó antes existen 3 principales causas de emisión de MP: la calefacción domiciliaria, sector vehicular y el sector industrial, y sectores con alta densidad poblacional

pueden ser propensos a mayor emisión de MP debido al aumento de las 3 causas mencionadas, específicamente a la calefacción domiciliaria, lo que conllevará por ende a mayor exposición de personas al MP dentro de una misma área.

De la Tabla 5.3, se desprende que las comunas con mayor densidad poblacional para el caso de menores a 4 años corresponderían a: Santiago centro, Cerro Navia, Independencia, Lo espejo, Lo Prado, mientras que las comunas con mayor densidad poblacional con habitantes mayores de 60 años corresponderían a: San Ramón, Ñuñoa, Lo prado, Lo Espejo y finalmente Independencia.

Historial de mortalidad por comuna dentro de la provincia de la RM por enfermedades asociadas al MP.

Este criterio considera el historial de mortalidad en todos los grupos etarios por cada comuna dentro de la provincia de la RM. Para este criterio se necesita tomar en consideración 2 aspectos importantes:

A) Como se ha presentado anteriormente, hay sectores etarios que presentan mayor riesgo de contraer enfermedades y sufrir mayores niveles de mortalidad.

B) Lo segundo es que para poder hacer efectiva la comparación entre comunas dentro de la provincia de la RM hay que considerar que no todas poseen la misma cantidad de población, por ende mayor cantidad, significaría según los estándares de la Organización Panamericana de la Salud (OPS), que mayores personas enfermarían en ése sector poblacional dentro de ésa comuna y adicionalmente, las enfermedades ocurren más a medida que la distribución de edades del sector se va desplazando al sector de tercera edad a medida que transcurre el tiempo. Para evitar esta comparación inexacta, el historial de mortalidad se analizará en base a dos herramientas utilizadas por el MINSAL según las recomendaciones de la OMS/OPS:

- Tasa de mortalidad cruda (TMC): Correspondiente al número de defunciones de cierto sector poblacional por cada 100000 habitantes del mismo sector [PAH, 2018].

- Tasa de mortalidad ajustada (TMA): Correspondiente a la TMC pero considera los cambios de mortalidad a través del tiempo, por lo que está estandarizada para eliminar efectos de diferencias entre dos o más grupos de la población. Para el TMA utilizado, se consideró un ajuste directo por 100000 habitantes, realizado por el SITAS (Sistema de información territorial de la autoridad sanitaria) [PAH, 2018].

Para el caso de la TMC, las 5 comunas con niveles más altos hasta el año 2016 son las comunas de Pedro Aguirre Cerda, La Cisterna, Lo Espejo, San Miguel y Providencia.

Para el caso de la TMA, las 5 comunas con niveles más altos hasta el año 2016 son las comunas de Lo Espejo, Pedro Aguirre Cerda, Independencia, La Cisterna y Recoleta (revisar valores de tasas de mortalidad en Tabla 5.4).

5.4. Método APH usado para identificar el sector óptimo para implementación de la SFT

Para comparar de manera más precisa las comunas dentro de la provincia de la RM y poder escoger óptimamente el sector a implementar el equipo, se procedió a realizar un análisis multicriterio utilizando el método APH (de las siglas en inglés "Analitycal Hierarchy Process"). En terminos simples, el método APH es una ponderación matricial de todos los criterios relevantes seleccionados, se le otorga mayor peso a algunos según criterios recomendados en estudios epidemiológicos y posteriormente se ponderan todas las comunas con todos sus criteriso correspondientes, matemáticamente el que de un mayor valor en el desarrollo final de la ponderación es la comuna con más peso en sus criterios respecto a otras (para mayor detalle del desarrollo, revisar anexo G).

A continuación, se presenta un diagrama con el objetivo principal, los criterios y subcriterios anteriormente expuestos para el método APH:

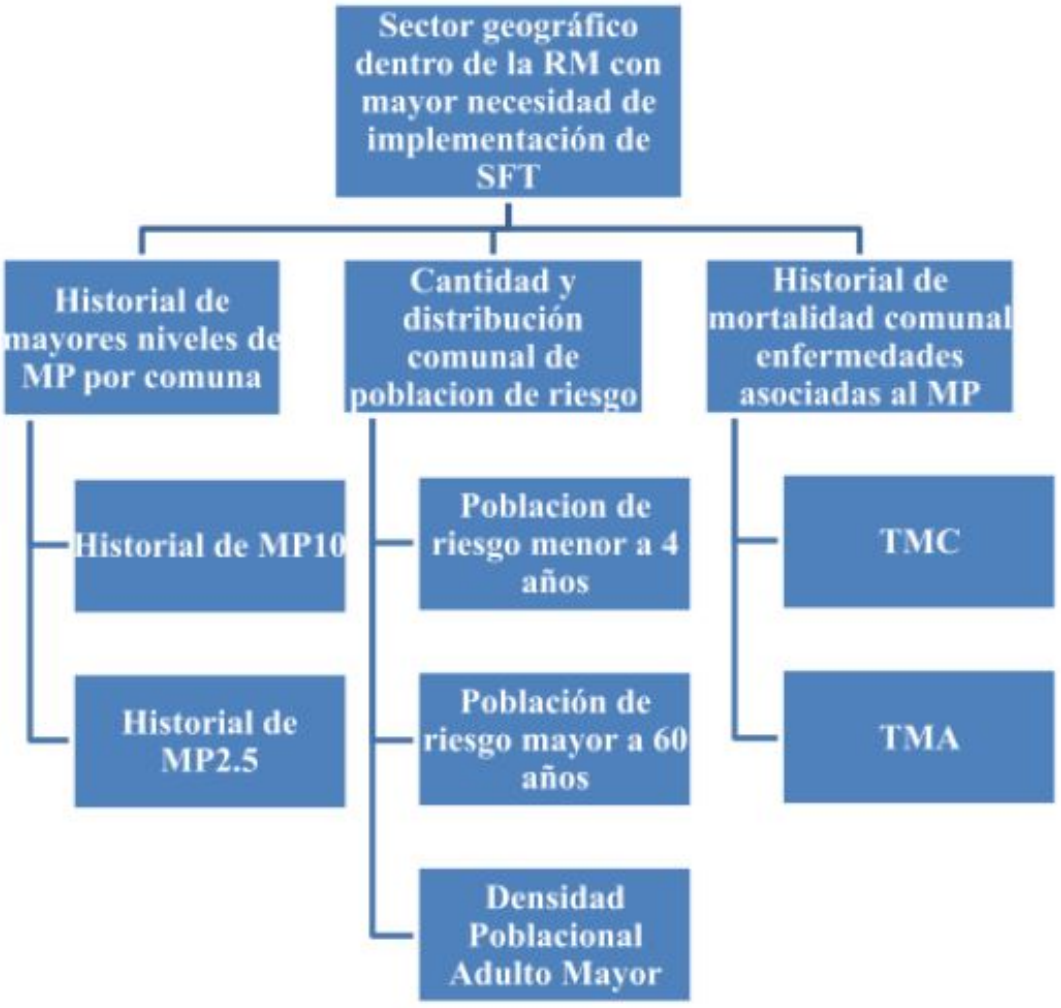


Figura 5.12: Esquema de objetivo, criterios y subcriterios del análisis APH. Fuente: elaboración propia.

Para la selección del sector, se considerarán sólo las comunas que posean datos e información en todos los 7 subcriterios anteriormente mencionadas, por lo tanto, las comunas que no posean método de medición de los niveles de MP en su zona serán descartadas, debido a que a primeras instancias no será posible contrastar datos del futuro modelamiento predictivo con la data empírica y en tiempo real entregada por SINCA. Lo mismo aplica para los demás criterios. En lo que respecta al criterio de densidad de población, se consideró la mayor a 60 años respecto de la menor a 4 años en el análisis APH, por las razones anteriormente explicadas en ítem de consecuencias para el caso de la Región Metropolitana.

A continuación se presenta la matriz de criterios por ponderación en conjunto con las opciones presentes que cumplen tener información de los 7 criterios anteriormente mencionados. Las matrices previas de comparación por pares y criterios que se utilizaron para armar ésta última matriz de decisiones así como también el procedimiento realizado para el desarrollo del método APH se puede observar en anexo G.

Tabla 5.4: Matriz final de decisión de sector más óptimo a implementar el proyecto según el método de selección APH. Fuente: elaboración propia.

	Historial MP10	**Historial MP2.5**	**Población menor a 4 años**	**Población mayor a 60 años**	**Densidad poblacional**	**TMC**	**TMA**	**Ponderación total**
Puente alto	0,029	0,046	0,100	0,096	0,098	0,095	0,097	0,0656
El Bosque	0,270	0,194	0,068	0,085	0,166	0,097	0,096	0,1090
La Florida	0,244	0,151	0,253	0,292	0,091	0,074	0,058	0,1166
Parque O'Higgins	0,130	0,163	0,100	0,096	0,098	0,095	0,097	0,0864
Pudahuel	0,138	0,151	0,121	0,085	0,038	0,053	0,150	0,0677
Cerro Navia	0,080	0,163	0,059	0,062	0,177	0,125	0,114	0,0940
Independencia	0,056	0,052	0,049	0,044	0,231	0,289	0,282	0,1418
Las Condes	0,017	0,036	0,141	0,187	0,056	0,118	0,041	0,0760
Quilicura	0,036	0,044	0,108	0,053	0,045	0,053	0,066	0,0418
Vector ponderación	0,106	0,088	0,047	0,106	0,107	0,318	0,027	

Según el método de selección por criterio multivariable, la mejor opción dentro de todas las comunas pertenecientes a la provincia de la RM, considerando los 7 subcriterios anteriormente expuestos es la comuna que presenta mayor número en el vector de ponderación total. Para

este caso correspondería a la comuna de Independencia como primera opción, seguida de la comuna de La Florida como segunda opción.

5.5. Resultado, características medioambientales y demográficas del sector escogido y justificación.

Considerando ambos sectores como mejores candidatos a implementar el proyecto, es necesario establecer otras diferencias más específicas que definirán si el equipamiento es más factible implementarlo en una u otra comuna, por lo que se procederá a detallar brevemente cada una de ellas.

La comuna de Independencia, ubicada en el sector norte de la ciudad de Santiago es una comuna con un área superficial de 7 [km^2], presentando una población total según el último censo en el año de 2017 de 100.281 habitantes, con una densidad aproximada de 13.551 habitantes por [km^2] y una población proyectada al año 2020 de 142.065 habitantes [SIIT, 2020a].

Esta comuna posee un total de 13 establecimientos de salud (se consideran hospitales, clínicas, consultorios, entre otros), y un total de 61.313 habitantes está inscrita en el plan de financiamiento para atención primaria de salud. En lo que respecta a tasa de natalidad, mortalidad general y mortalidad infantil, la comuna presenta tasas de 17,9 [c/1000 hab], 10,9 [c/1000 hab] y 7,4 [c/1000 nacidos vivos] respectivamente [SIIT, 2017a]. En lo que respecta a la información necesaria para la comparación de criterios realizada previamente, se presenta la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Valores de los factores más críticos a considerar de la comuna de Independencia para la implementación del proyecto. Fuente: elaboración propia.

Datos	**Independencia**
Promedio Histórico MP10 [ug/m^3]	69,15
Promedio Histórico MP2.5[ug/m^3]	26,92
Población menor a 4 años	6.607
Población mayor a 60 años	15.060
Densidad poblacional menores a 4 años [Hab/Km^2]	943,9
Densidad poblacional mayores a 60 años [Hab/Km^2]	2151,4
TMC (2016)	81,8
TMA (2016)	53,3

De la Tabla 5.5 se pueden observar distintos factores: ambos promedios históricos de MP sobrepasan las normas primarias establecidas por el MMA. Siendo más específicos, según la información entregada por SINCA, el comportamiento en los niveles de MP es oscilante dependiendo de la época del año, incrementándose significativamente en los meses de mayo a septiembre en prácticamente todos los años (Ver gráficas SINCA de las comunas de Independencia y La Florida en anexo D). En lo que respecta a la población de riesgo presente en esta comuna hasta la fecha, si bien ésta no posee la mayor cantidad de habitantes, si presenta la mayor densidad poblacional respecto a la comuna de La Florida. Considerando que el

equipo SFT es una fuente fija que logra un volumen localizado de aire purificado, la densidad poblacional presentará un papel importante para la estimación de cuantas personas estarán expuestas en cierto volumen fijo de funcionamiento de la torre para los cálculos futuros.

Para el caso de las tasas de mortalidad bruta y ajustada, la comuna de independencia presenta significativamente una mayor cantidad de muertes cada 100.000 habitantes en comparación a la comuna de La Florida. Es importante considerar esto último debido a que tal como existen factores medioambientales o factores biológicos de la población de riesgo que pueden incidir, también existe un factor importante a considerar en cuanto al impacto de la contaminación atmosférica y son las medidas en el sistema de salud tanto pública como privadas de las cuales la comuna dispone para la atención, cuidado y recuperación de las personas de los sectores de riesgo consideradas en los criterios, sin embargo, éste estudio no contempla el grado de eficiencia y disponibilidad de la configuración de las redes de salud de éste sector de la RM, por lo tanto, no es posible comparar detalladamente los niveles de atención de salud entre ésta comuna y la comuna de La Florida.

Por último, puesto que el equipo es usualmente implementado en lugares públicos de áreas verdes tales como parques y plazas, es importante considerar todas las áreas de éste tipo que la comuna posea, y más importante aún es considerar si estos sectores poseen cercanamente complejos de salud como hospitales o clínicas de rehabilitación para pacientes con problemas y enfermedades respiratorias, así como también si existen complejos de viviendas con gran cantidad de población de riesgo en su interior, tal como es el caso de asilos o viviendas de adultos mayores para así poder asegurar un contacto más probable entre el beneficio de la torre purificadora y éstos habitantes de riesgo. A continuación, se presenta un mapa con los principales sectores de áreas verdes de la comuna de Independencia, en conjunto con los principales establecimientos públicos de salud, y viviendas de adulto mayor:

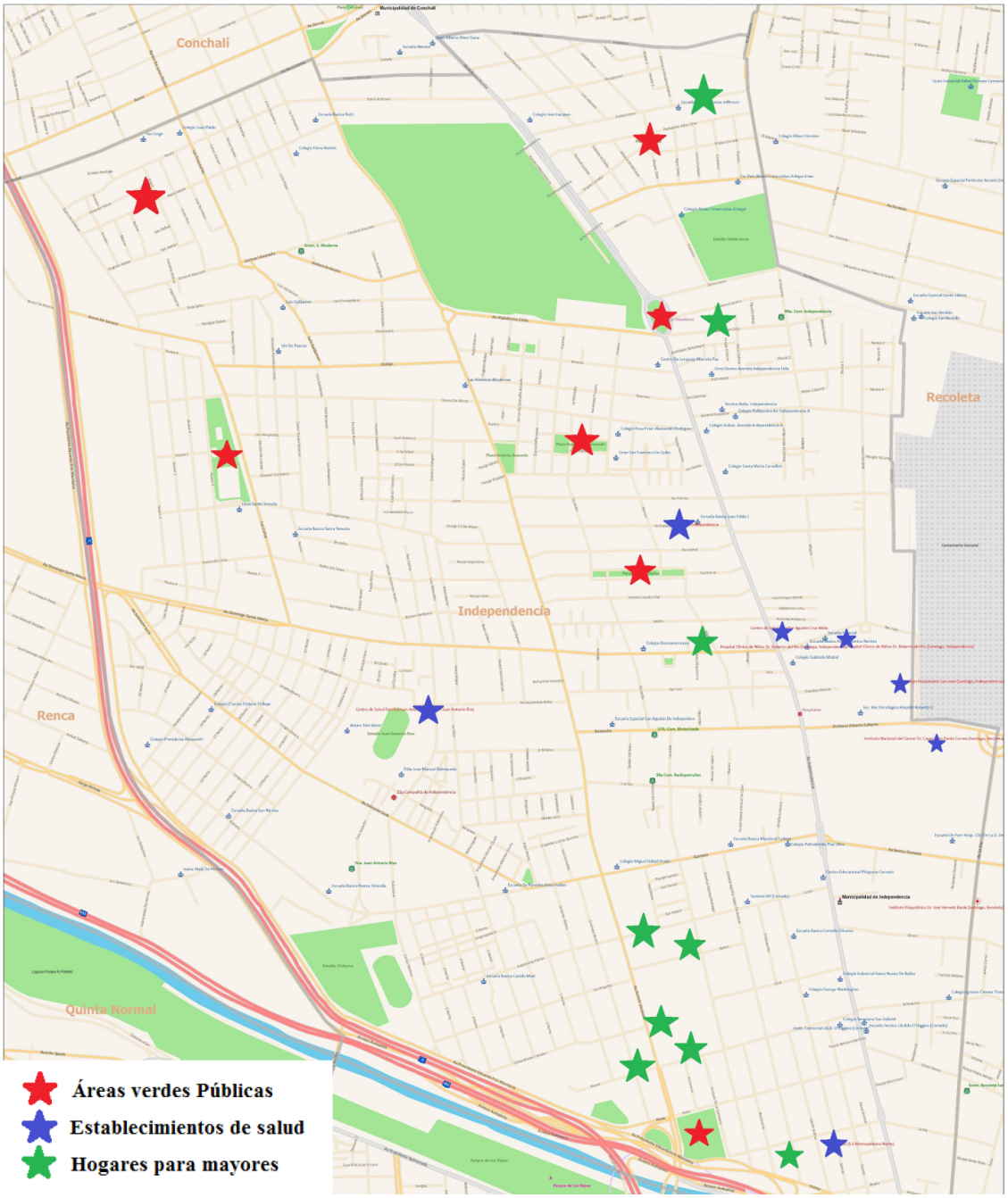


Figura 5.13: Mapa de la comuna de Independencia con los principales establecimientos y áreas verdes a considerar para la implementación del equipo. Fuente: Elaboración propia a base de [SIIT, 2017a].

En el caso de La Florida, ésta es una comuna con un área superficial de 70,2 [km^2], está ubicada en el sector suroriente de la provincia de la RM, y presenta una población total según el último censo de 366.916 habitantes, con una densidad aproximada de 5.226,7 habitantes por [km^2] y una población proyectada para el año 2020 de 402.433 habitantes [SIIT, 2020b].

Esta comuna posee un total de 36 establecimientos de salud (considerando las mismas categorías que en el caso de la comuna de Independencia) y un total de 291.086 habitantes

inscritos en el plan de financiamiento para la atención primaria de salud. En lo concerniente a la tasa de natalidad, mortalidad general y mortalidad infantil, la comuna presenta tasas de 12,2 [c/1000 hab], 5,2 [c/1000 nacidos vivos] y 5,7 [c/1000 nacidos vivos] respectivamente [SIIT, 2017b].

En lo que respecta a la información recolectada para la comparación de criterios se tiene la Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Valores de los factores más críticos a considerar de la comuna de La Florida para la implementación del proyecto. Fuente: elaboración propia.

Datos	**La Florida**
Promedio Histórico MP10 [ug/m^3]	76,23
Promedio Histórico MP2.5 [ug/m^3]	30,53
Población menor a 4 años	22.262
Población mayor a 60 años	67.740
Densidad poblacional menores a 4 años [Hab/Km^2]	317,1
Densidad poblacional mayores a 60 años [Hab/Km^2]	965,0
TMC (2016)	55,1
TMA (2016)	34,2

Para el caso de los datos de la Tabla 5.6 referente a la comuna de La Florida, se pueden observar ciertas similitudes, pero también diferencias marcadas en comparación a la comuna de Independencia. En lo que respecta a similitudes, nuevamente lo niveles en ambas categorías de MP no cumplen los estándares ni nacionales ni internacionales, siendo en la comuna de La Florida aún mayores que en Independencia.

En lo que respecta a la información entregada por SINCA, el comportamiento histórico en los niveles de MP también posee un carácter oscilante según la época del año, incrementándose significativamente entre aproximadamente los meses entre mayo y noviembre con un comportamiento que se repite nuevamente en prácticamente todos los años (Ver gráficas SINCA La Florida en anexos D), provocando por consecuencia, las mismas condiciones que perjudicarán eventualmente a la población de ésta comuna, sobre todo a los pobladores de riesgo. En lo que respecta a esta población de la comuna, hasta la fecha, ésta es notoriamente mayor tanto para los menores de 4 años, como para los mayores a 60 años. Sin embargo, tomando en consideración el mismo criterio de la importancia de la densidad poblacional, La comuna de la Florida posee una densidad poblacional mucho menor respecto a la comuna de Independencia.

Para el caso de las tasas de mortalidad bruta y ajustada, la comuna de La Florida presenta menores tasas para ambos casos respecto a la comuna de Independencia. Éste valor de tasas bruta y ajustada es en algunos aspectos difícil contextualizarlo en cuanto a por qué son menores que en la otra comuna en comparación, ya que, tal como se mencionó anteriormente, pueden existir factores inherentes a las características físico/biológicas de las poblaciones de ambas comunas, así como también puede tener relación con la calidad y cobertura del área de salud hacia los pobladores de las respectivas comunas, sin embargo éste aspecto tal como se mencionó antes, está fuera de consideración para éste estudio.

Del mismo modo que la comuna de Independencia, se mostrará la ubicación de los establecimientos clave donde existe una mayor probabilidad de encontrar pobladores de riesgo en cuanto a la calidad del aire. Se considerarán nuevamente complejos de salud públicos, establecimientos para mayores y áreas verdes públicas de uso común (nota: al ser una comuna de mucha mayor superficie, se procederá a presentar sólo las áreas urbanizadas y se realizará mostrando una sección norte y otra sección sur de la comuna):



Figura 5.14: Mapa del sector norte de la comuna de La Florida con los principales establecimientos y áreas verdes a considerar para la implementación del equipo. Fuente: elaboración propia a base de [SIIT, 2017b].

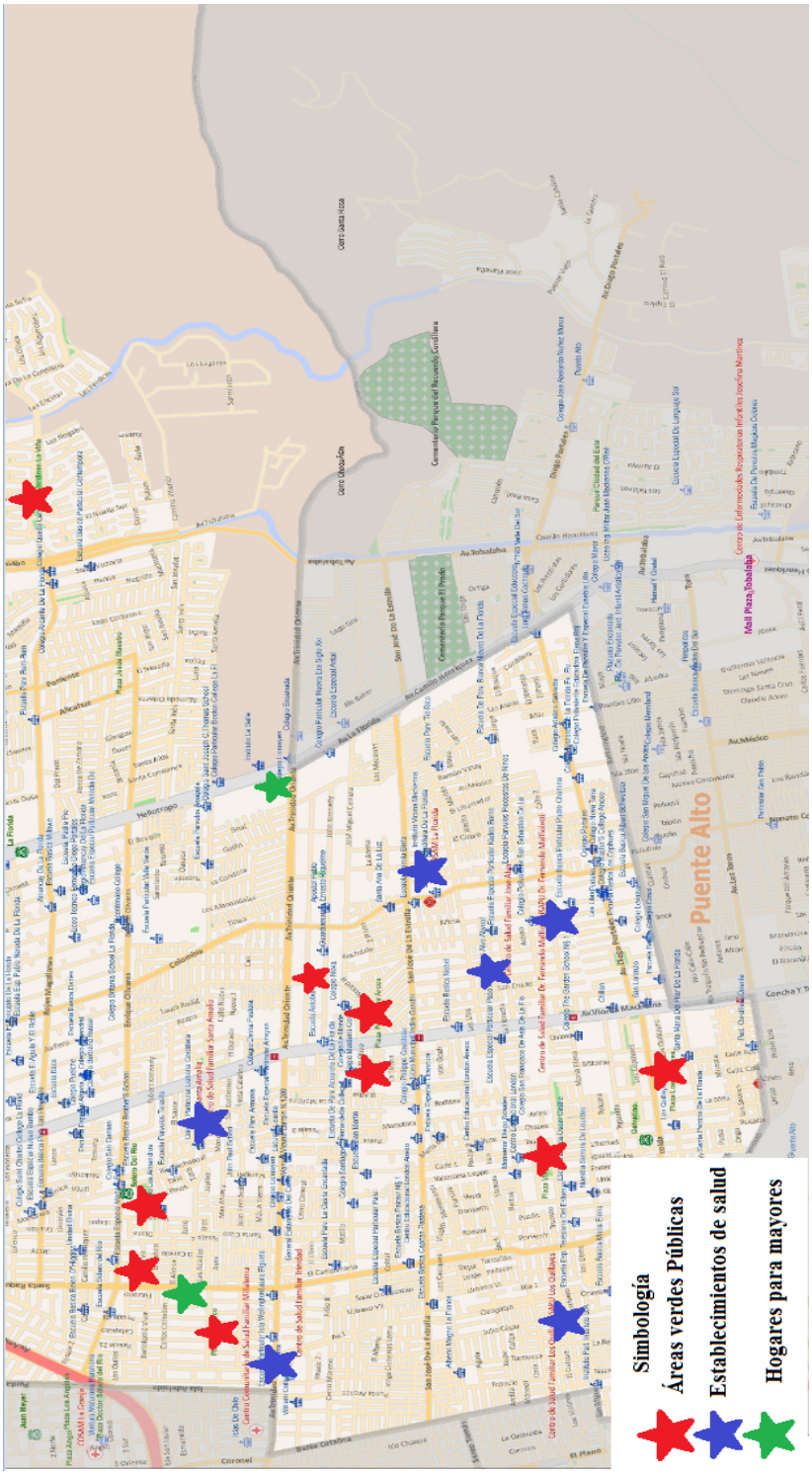


Figura 5.15: Mapa del sector sur de la comuna de La Florida con los principales establecimientos y áreas verdes a considerar para la implementación del equipo. Fuente: elaboración propia a base de [SIIT, 2017b].

Analizando la situación entre ambas comunas se optará por evaluar la posible instalación de la SFT en la comuna de Independencia, las justificaciones de ésta elección son las siguientes:

- Las tasas de mortalidad presentadas en la comuna de Independencia son significativamente más elevadas que en la comuna de la Florida, mostrando un efecto empírico e histórico de cómo la población se ve afectada por enfermedades respiratorias asociadas al MP.

- Si bien de estudios se ha informado que el MP10 afecta directamente al sistema respiratorio de las personas, también se ha indicado que el MP2.5 es más peligroso en cuanto a enfermedades y dificultades respiratorias a corto y largo plazo, en éste caso, ambas comunas presentan un historial de MP2.5 casi idéntico, siendo que éste criterio fue el segundo más importante a valorar.

- Para el caso de la densidad poblacional, se explicó anteriormente por qué éste es un factor más importante que la cantidad de población de riesgo en sí dentro de cada comuna. La Florida presenta una población de riesgo mucho más grande que la comuna de Independencia en cantidad, sin embargo ésa comuna al ser significativamente más amplia, la concentración de éste sector para personas de riesgo se supondrá mucho más distribuida. Ya que la torre presenta un área de funcionamiento reducido y específico, es mejor implementarla en un sector geográfico que a pesar de tener menor población de riesgo, ésta esté más "concentrada".

- Para la ubicación del equipamiento, es de mayor importancia un lugar específico que sea cercano a clínicas y hogares de población de riesgo. No es útil disponer de muchas áreas verdes rodeando a solo 1 establecimiento de salud u hogar de mayores, tampoco es óptimo que el sector de instalación de la torre esté muy alejado del resto de los establecimientos mencionados ya que lo que se busca es lograr el mayor alcance posible a la población de riesgo. En éste estudio, para el alcance de usuarios beneficiados además de considerar pobladores de riesgo, también se considerarán pobladores y usuarios "normales" dentro del sector geográfico escogido puesto que las funciones dosis-respuesta que se utilizarán no discriminan efectos en función del grupo etario.

- Bajo todas éstas consideraciones, la comuna de Independencia, presenta un buen candidato que combina un área verde pública, cercanía a variados establecimientos para población mayor y cercanía a un establecimiento de salud, además de encontrarse cerca de un amplio complejo de viviendas urbanas y de un establecimiento de carabineros de Chile para facilitar seguridad.

5.6. Alcance del proyecto.

5.6.1. Alcance geográfico.

El lugar para la implementación estudiada de la torre será entonces en el sector de área verde pública ubicada entre la calle Anibal Pinto y la avenida Fermín Vivaceta en la comuna de Independencia (de coordenadas geográficas 33,25° latitud Sur, 70,39° longitud Oeste):

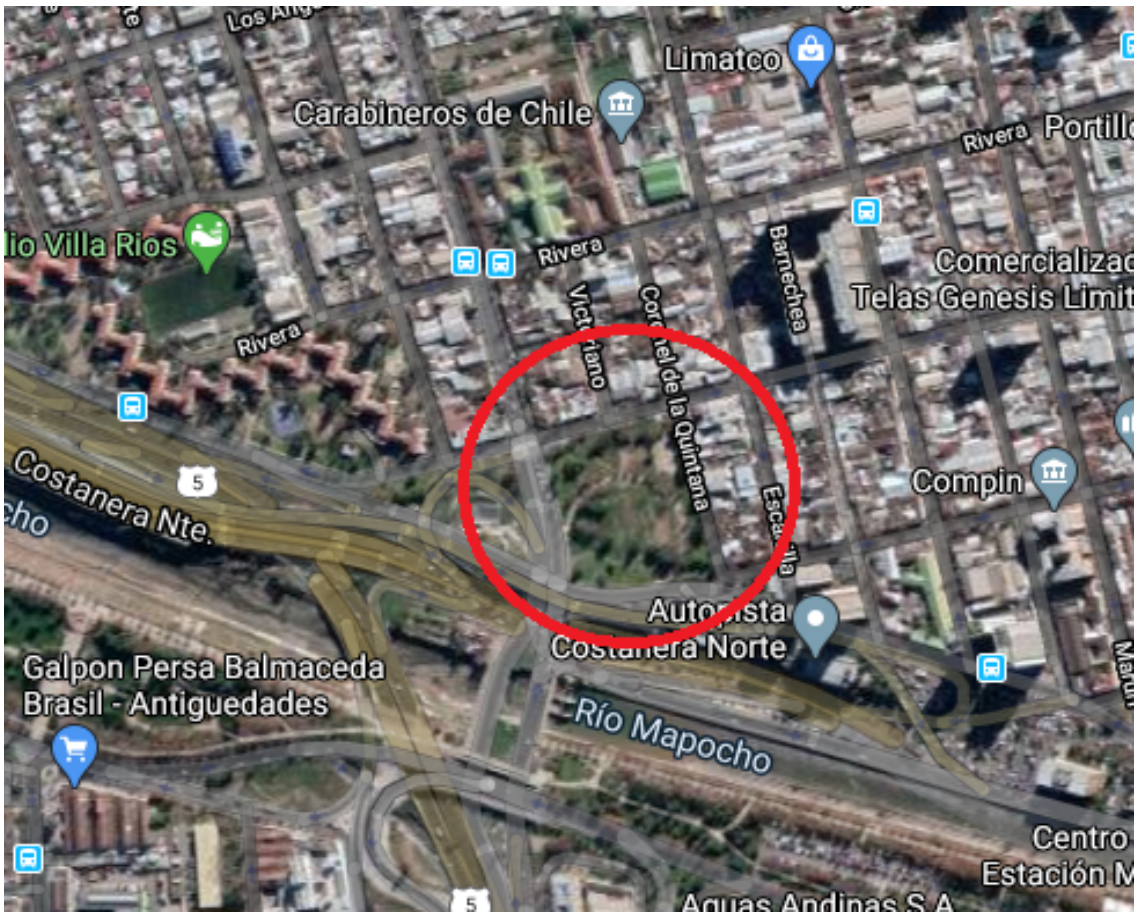


Figura 5.16: Mapa del sector escogido dentro de la comuna de Independencia, Fuente: elaboración propia.

5.6.2. Alcance temporal.

De los estudios previos, se ha evidenciado que la calidad del aire trae consecuencias en la salud, y pueden provocar tanto efectos inmediatos como efectos a muy largo plazo en las personas. Sin embargo, puesto que se trabajará en el estudio técnico con un modelamiento del comportamiento de MP a la que se expondrá la torre, por razones de capacidad de modelamiento, el tiempo hipotético de implementación y funcionamiento de la SFT en el sector escogido será limitado, y considerará un periodo de 1 mes de duración, considerando el mes de agosto del año 2020. El funcionamiento de la torre se considerará diario e interrumpido sólo por 1 [hr] para la limpieza y recolección del MP extraído en el área, el cual debe hacerse según la empresa cada 1 semana. Entonces finalmente el tiempo base será la totalidad del mes de agosto del año 2020, específicamente desde el 31 de Julio del año 2020 hasta el 29 de Agosto del mismo año.

5.6.3. Contaminantes considerados.

Los contaminantes considerados a mitigar de manera localizada con este proyecto son las partículas totales en suspensión o PTS, específicamente el rango de MP de 10 [µm] a 2.5 [µm] que estén presentes en el volumen atmosférico del sector geográfico especificado previamente.

5.6.4. Fuentes emisoras consideradas en el sector.

Para el inventario de emisiones de la zona seleccionada y de la provincia de la RM y también para la posterior modelación del sector donde se encontrará la SFT, se considerará un inventario de emisiones que contenga las siguientes formas de emisión de contaminante:

- Fuentes fijas y areales: chimeneas industriales registradas y quemas agrícolas posibles.
- Fuentes móviles: en calles o carreteras del sector, tales como emisión registrada anual de autos particulares, transporte público, camiones, motocicletas, taxis y colectivos además de fuentes móviles de rutas externas tales como tractores agrícolas y aeropuertos posibles.
- Fuentes domiciliarias fijas: casas particulares con posible emisión de MP (hogares con chimeneas, quema de leña o cualquier otra forma de calefacción documentada que emita MP).

5.6.5. Alcance Poblacional y receptores afectados.

Respecto a la población involucrada en este proyecto, se considerará la población de la comuna de Independencia proporcional al área de funcionamiento de la torre respecto a la población total de la comuna que según el Censo realizado en el año 2017, fue de un total de 100.281 habitantes, esta decisión se explicará posteriormente en la modelación.

5.6.6. Efectos en la salud considerados.

En los efectos de contaminación por MP se considerarán sólo los efectos que ataquen directamente a la salud de la población. Se considerarán las afecciones a corto y a largo plazo que puedan disminuir su probabilidad de ocurrencia en la población debido a una exposición periódica y breve al aire purificado entregado por la SFT. Como requisito, las enfermedades de las categorías anteriormente mencionadas se considerarán además si poseen suficientes estudios previos que avalen una relación directa con la exposición a niveles de MP fuera de la norma y que además permitan estimar la implicancia económica por padecerlas. Las que entrarán al análisis serán las siguientes:

- Mortalidad.
- Admisiones hospitalarias respiratorias.
- Enfermedades cardiovasculares.
- Días de actividad restringida en adultos.
- Enfermedades respiratorias bajas en niños (bronquitis y tos).
- Bronquitis crónica.
- Ataques de asma.

5.6.7. Escenarios de análisis.

En ésta investigación se analizará el siguiente escenario: Primeramente se obtendrá la concentración de contaminante en la zona de ubicación del equipo. Posterior a esto se utilizarán los parámetros de eficiencia de la torre para estimar cuanto disminuiría la concentración si

ésta estuviera actualmente operando en ése sector. Con esto es posible cuantificar una variación en las concentraciones del sector, las cuales servirán para ser utilizadas en funciones dosis-respuesta para medir el impacto en los cambios de niveles de MP en el sector comparándolas nuevamente con las normas establecidas para niveles de concentración de MP en Chile.

Tabla 5.7: Resumen de los alcances considerados en la investigación.

Alcance	**Descripción**
Geográfico	Parque ubicado entre la calle Anibal Pinto y la avenida Fermín Vivaceta.
Temporal	1 mes de modelamiento (Agosto 2020).
Contaminantes	MP10 y MP2.5.
Efectos	Aumento de mortalidad prematura, morbilidad y pérdidas económicas asociadas, afecciones asociadas a la contaminación atmosférica.
Fuentes emisoras	Fuentes fijas: chimeneas y emisiones industriales, calefacción domiciliaria, Fuentes móviles: Sector Vehicular.
Receptores	Población habitante en la comuna de Independencia, específicamente la población proporcional correspondiente al área que abarca la zona de implementación de la torre.
Escenario	Proyección de contaminación sin la implementación inicial del equipamiento y con la implementación y funcionamiento del equipamiento durante el mes de Agosto del año 2020.

5.7. Análisis FODA.

Como éste estudio trata sobre un proyecto de prefactibilidad técnico-económica pero aplicado más bien a aliviar una situación social imperante dentro de la RM, es importante realizar un análisis de los aspectos positivos propios del proyecto y de las oportunidades externas que podrían facilitar su realización, así como también dar a conocer los aspectos negativos propios del proyecto y las amenazas externas que pueden dificultar la posible realización de éste.

Fortalezas

- El proyecto implementa una tecnología altamente especializada en la captura de MP.
- Esta tecnología ya ha sido probada e implementada en otras regiones del mundo con muy similares o peores características de calidad del aire respecto a la RM.
- Tiene una baja taza de consumo energético en comparación con otras tecnologías de mitigación de contaminantes atmosféricos (incluyendo los de tipo industrial).
- Posee numerosos estudios científicos, académicos y reconocimientos de entidades internacionales en cuanto a desarrollo sustentable y tecnologías innovadoras.

- El equipamiento es de fácil implementación y manejo.
- Es parte de las tecnologías emergentes a nivel mundial que han sido pensadas específicamente para combatir el MP a nivel de espacios comunes o públicos, presentando una de las más altas eficiencias respecto a las demás tecnologías.
- Esta tecnología es parte de un proyecto mayor llamado "smog free project", el cual consiste en un plan a gran escala para controlar el MP de las ciudades que ofrece el estudio Roosegaarde.
- El equipamiento ya ha sido solicitado por numerosas entidades gubernamentales en distintos países e incorporado como parte de sus estrategias para el control de la contaminación atmosférica.
- Una consecuencia de disminuir el MP, se traduce en una reducción de gastos asociados a salud, lo cual es un beneficio tanto para la población como para el estado y el sistema de salud pública.
- Compuestos químicos adversos emitidos por la torre tales como el ozono son de niveles despreciables según el ENS.
- El MP recolectado es fácil de manipular.

Oportunidades

- Existe una "demanda" histórica y que ha sido insuficientemente satisfecha, la cual hace referencia a los niveles de MP a los que se expone diariamente la población de la RM.
- El equipo SFT posee características alienadas a las políticas del ministerio del medio ambiente: ecológico y sustentable.
- Actualmente en la provincia de la RM y en Chile no hay "competencia", es decir, no existen otras empresas o iniciativas ofreciendo soluciones para lograr una la reducción directa de MP en sectores públicos tipo parques y plazas.
- En base a los pronósticos futuros de las entidades estatales, la situación de altos niveles de contaminación atmosférica en la RM irá en aumento.
- El proyecto puede añadirse como parte de las medidas actuales de compensación de emisiones planteadas por el PPDA, por lo que tiene un mayor respaldo institucional.
- Existen variadas formas de financiamiento del proyecto, tales como los fondos estatales y programas de impulso para emprendimientos locales.

Debilidades

- Inversión inicial elevada.
- Requiere mantención y retirar los residuos cada cierto tiempo.
- Se debe planificar cómo se tratarán los residuos recolectados.
- No existen estudios previos ni experimentación previa con el equipamiento en nuestro país, tampoco existe un modelamiento fluido dinámico específico en el área donde operará la SFT, sólo se disponen de informes de funcionamiento en otras ciudades del mundo.
- Al ser un proyecto de impacto social, el impacto no se traduce ni se mide en ganancias monetarias directas.

- Debido a lo anterior, los resultados en ahorro de gastos en salud y disminución de tasas de mortalidad/morbilidad no se pueden observar inmediatamente, las funciones dosis-respuesta entregan valores estimativos, pero sigue habiendo una incertidumbre asociada respecto al fenómeno real.
- Requiere transporte cuidadoso.
- Requiere consumo de energía eléctrica, a diferencia de otras tecnologías con funcionamiento más independiente.
- Requiere instalación y puesta en marcha inicial.
- El alcance de acción del equipamiento es reducido.
- Su eficiencia varía según cambios bruscos de las condiciones meteorológicas circundantes.

Amenazas

- La implementación y apoyo del proyecto depende de políticas medioambientales vigentes.
- Los creadores de la tecnología se encuentran geográficamente lejos por lo que la asesoría terminaría siendo no presencial.
- El trayecto desde la empresa creadora hasta el lugar a implementarse presenta riesgos logísticos debido a la distancia.
- Requiere de la disponibilidad del sistema eléctrico del sector.
- Necesita de protección y vigilancia adecuada, sobretodo si es en un sector público, ya que se expone a daños por parte de la población si no se protege adecuadamente.
- El impacto de la SFT depende en gran medida de la cantidad de población efectivamente expuesta a su radio de limpieza.
- Puede requerir de campañas de marketing y publicidad efectivas para incentivar a la población a utilizar y disfrutar del beneficio que propone el equipo.

Capítulo 6

Modelamiento y justificación

6.1. Inventario de emisiones a utilizar

Para poder llevar a cabo el estudio técnico y trabajar con los softwares de modelación escogidos que entregaran los niveles de MP a la cual la SFT estará hipotéticamente expuesta, es indispensable considerar un inventario de emisiones de la provincia de la RM que contenga el sector geográfico seleccionado. A modo de contextualización, un inventario de emisiones es una "lista" de todas las fuentes que emiten hacia la atmósfera algún tipo de compuesto químico considerado como contaminante.

Esta lista representa un estimativo de las emisiones en un cierto intervalo de tiempo y considerando un área geográfica específica, ya sea un sector reducido de viviendas, una empresa, una localidad, o a nivel más grande un sector comunal o regional. La cantidad de contaminantes presentados en un inventario de emisiones se suelen presentar en unidades de masa/tiempo o porcentajes.

Cabe destacar que los inventarios de emisiones debido a la complejidad que toma crearlos, poseen un considerable nivel de incertidumbre [Saide P., 2008] por lo que siempre los inventarios de emisión a utilizar podrán sobre o subestimar los verdaderos valores que emiten uno o la totalidad de fuentes emisoras de un sector en particular en la realidad.

En lo que respecta a su utilidad, los inventarios de emisiones, dependiendo del país y la organización que los requiera, suelen ser utilizados para diversos propósitos tales como identificación de fuentes de emisión, identificar cantidad, distribución y tendencias de contaminantes, participar en modelaciones de dispersión de contaminantes y ayudar para tomar mejores decisiones para estrategias de control o para evaluar riesgos posibles a la salud de la población entre otras motivaciones.

Para el caso de la Región Metropolitana, los inventarios de emisiones han sido necesarios para desarrollar de mejor manera los modelos que permiten estimar concentración de contaminantes y por consiguiente para mejorar el sistema de gestión de calidad del aire. La planificación del PPDA actual utilizó como insumo un inventario de emisiones realizado por el Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile, junto con otras

organizaciones tales como CMM, GEASUR y la consultora POCH Ambiental.

Para la modelación predictiva de este estudio, es necesario que la información del inventario de emisiones sean lo más actuales posibles al año presente (2021) para así poder minimizar los errores de predicción de los programas de modelación de dispersión de contaminantes a utilizar. Dicho esto, se utilizará la siguiente información de emisiones de MP para la comuna de Independencia:

- Data de emisiones de MP de todas las fábricas y empresas registradas en la Región Metropolitana al año 2019 proporcionadas por RET-C, MMA, específicamente las ubicadas dentro de la comuna de Independencia. Para éstas fuentes se utilizará Google Earth® para registrar la medición de área de éstas fuentes ya que el programa de modelación seleccionado requiere el área de este tipo de fuentes (registradas en el programa como fuentes areales).
- Datos de las emisiones por calles en la RM del año 2019, considerando transporte vehicular y camiones grandes de transporte, en formato de shapes o arcos por calles entregado por SECTRA y el MMA en colaboración con el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (MTT), específicamente las calles contenidas dentro de la comuna. Los valores de emisión de MP por calle o nodos serán obtenidos a partir del mapa de calles de Santiago utilizando el programa Arcgis® en conjunto con la documentación facilitada por el MTT.
- Aporte de tipo viviendas urbanas del sector mediante la información entregada por el estudio "actualización y sistematización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana", realizado por el Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile. En ella se expone el aporte de MP anual proveniente de distintas comunas incluyendo la comuna de Independencia y por distintas estufas y otros equipos de calefacción registradas en hasta el año 2014. Al no poseerse datos de distribución geográfica de cada tipo de estufa u otros equipos de calefacción con emisión de MP se considerará una emisión proporcional a la densidad poblacional de la comuna, densidad obtenida gracias a la información entregada por el INE en la sección de Geodatos abiertos y densidad de población y vivienda [INE, 2017].

De ésta manera, considerando todos los aportes de emisión de MP dentro de la comuna de Independencia se obtendría una proporción de aportes por sector residencial de un 35 %, aporte del sector industrial de un 26 % y aporte del sector vehicular en un 39 %.

6.2. Modelamiento predictivo de concentración de contaminante

Tal como se mencionó antes, para estimar de manera adecuada los niveles y la concentración del contaminante en la zona escogida y en el tiempo seleccionado, es necesario optar por instrumentos que predigan de una manera suficientemente satisfactoria las concentraciones de material particulado.

Es necesario lo anteriormente mencionado debido a que se necesita saber bajo qué condiciones la SFT operará y también es necesario para cuantificar la variación de la concentración

de MP utilizada como parámetro en las funciones dosis-respuesta posteriores, puesto que la concentración es un parámetro que éstas necesitan para entregar resultados tal como se explicó anteriormente.

Estudios epidemiológicos internacionales avalan la utilización de modelamientos computacionales para predecir el comportamiento de concentraciones de distintos contaminantes atmosféricos.

A nivel nacional, según los lineamientos señalados por el SEA, se establece que se deben utilizar modelos de dispersión atmosféricos que puedan emular los niveles y concentraciones de contaminantes, sean modelos Gaussianos, modelos Eulerianos, modelos Lagrangeanos o modelos de tipo "puff" debido a la gran escala espacial de estudio que usualmente se consideran en los análisis epidemiológicos para estimar concentraciones de contaminantes primarios y secundarios. Los métodos de modelación recomendados se presentan en la tabla a continuación:

Tabla 6.1: Tipos de modelos recomendados según los estudios epidemiológicos y el SEIA para la estimación de concentraciones de contaminantes atmosféricos para estudios epidemiológicos. Fuente: [Ministerio del Medio Ambiente, 2012].

Modelo	**Ejemplo**	**Requerimientos**
Caja Lagrangeanos	PLMSTAR, RADM DIFKIN, EKMA	-Campos de viento -Inventario de emisiones a lo largo de los vientos
Grilla Eulerianos	UAM, CALGRID CAMx,CMAQ, MATCH	-Inventario de emisiones desagregados espacial y temporalmente -Condiciones iniciales y de borde para cada contaminante de cada celda de la grilla -Meteorología en 3 dimensiones para cada celda de la grilla
Grilla Gaussianos	AERMOD	-Distribución geográfica espacial -Condiciones estacionales
Modelos tipo "puff"	WRF + CALPUFF	-Combinación de Lagrangeanos y Gaussianos -Campos de viento -Inventario de emisiones a lo largo de los vientos -Distribución geográfica espacial -Condiciones estacionales

Pero para el caso de Santiago no existen actualmente estudios sobre modelamiento de contaminantes atmosféricos especificado para la comuna de Independencia, sin embargo existen algunos estudios previos con modelamiento predictivo que son buenos referentes:

- El estudio realizado en una región con comportamientos muy similares de material particulado [Ostro, 1994], el cual determinó un mapa dividido por celdas y que entregó

isopletas en la región de Jakarta en Indonesia, las cuales fueron muy similares en comportamientos de concentración a distintas áreas de la Región Metropolitana en el año 1994.

- El estudio realizado por el Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile mencionado anteriormente, el cual fue realizado para distintos contaminantes atmosféricos, utilizando el programa Airviro ®.
- El estudio realizado en la Universidad de Chile [Saide P., 2008], el cual buscó mejorar el inventario de emisiones de ésa época mediante técnicas de modelación inversa, utilizando las condiciones meteorológicas y geográficas de la cuenca de Santiago, específicamente para predecir mejor el inventario de emisiones de CO utilizando la metodología "bottom up", es decir, utilizó un modelo para estimar temporal y espacialmente las emisiones de CO calle por calle dentro de la ciudad de Santiago de Chile.

Puesto que el área que se pretende modelar es amplia y los límites del dominio geográfico de modelación están a más de 5 [km] de varias fuentes de emisión consideradas, según la guía para el uso de modelos de calidad del aire del SEIA, lo recomendable para este tipo de estudios es utilizar modelos de tipo "puff".

Antes de continuar con la especificación de los programas de modelamiento de dispersión de contaminantes a utilizar, es necesario discutir algunas consideraciones de porqué sería necesario utilizar programas de modelación de dispersión en vez de utilizar de solamente seguir la información de la zona entregada por la red MACAM-RM.

La estación de monitoreo de la red MACAM de Independencia (lat 33°25 S, long 70°39 O) cumple legalmente con las condiciones de representatividad definidas en [Decreto 59, 1998]:

- Está ubicada dentro de un área habitada de un circulo de radio de 2 [km] contados desde la estación.
- Está ubicada a más de 15 [m] de la calle o avenida más cercana y a más de 50 [m] de calles con flujos iguales o mayores a 2.500 [vehículos/día].
- Está ubicada a más de 50 [m] de la salida de un sistema de calefacción (que utilice carbón, leña o petróleo).

Por lo tanto, inicialmente se debería poder utilizar los valores de concentraciones de MP que entrega la estación de monitoreo, sin embargo, no se utilizarán directamente los datos de la estación de monitoreo de MACAM y se opta por la modelación de dispersión de contaminantes por las siguientes razones:

- La estación de monitoreo de la comuna de Independencia se encuentra prácticamente contenida dentro una de las fuentes de emisión fijas registradas por la RET-C, la cual sería el área del Hospital Clínico de la Universidad de Chile, por lo tanto, si bien no hay estudios que determinen si ésta situación altera significativamente de alguna manera las mediciones registradas por la estación de monitoreo, es preferible tomar en cuenta éste factor (la ubicación específica de la torre está ubicada aproximadamente a 1 [km] de distancia desde la estación de monitoreo y no está expuesta directamente a las emisiones de la fuente fija especificada anteriormente, por lo que los valores entregados de la estación podrían tener un error de representatividad para la torre):

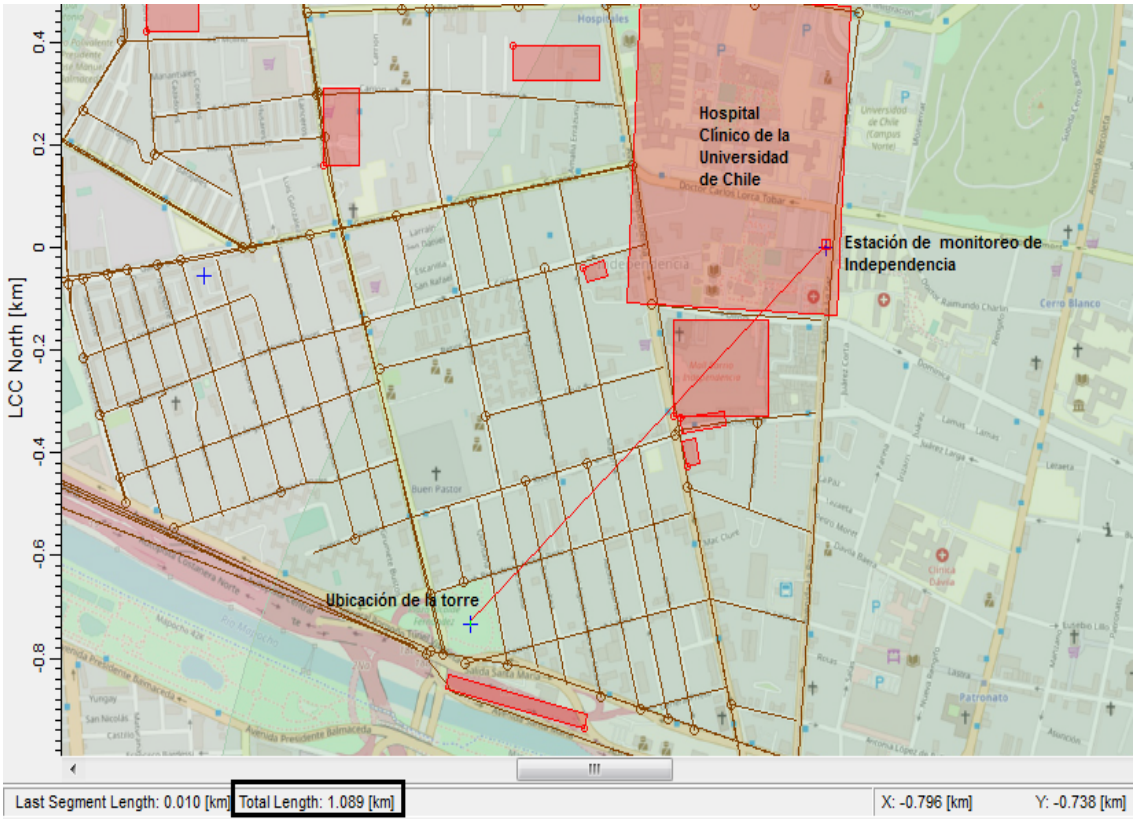


Figura 6.1: Mapa de la ubicación de la estación de monitoreo de la comuna de Independencia y la ubicación geográfica anteriormente detallada de la torre. Fuente: elaboración propia.

- Otro motivo por el cual se decidió utilizar programas de modelación que especifiquen la concentración en el área geográfica que abarca la torre es debido a que los estudios de validación del funcionamiento de la torre han considerado la interacción con el equipo y la concentración de MP directamente circundante a su ubicación (Ver anexo E), por lo tanto para respetar la metodología utilizada por los creadores del equipo, es preferible trabajar con concentraciones que rodeen directamente el área de alcance de la torre.
- Respecto a los factores geográficos y meteorológicos, tal como se mencionó anteriormente, Santiago cuenta con una dirección de vientos ampliamente estudiada, por lo tanto, es esperable que la estación de monitoreo y la ubicación del equipo experimenten ciertas divergencias en cuanto a valores de temperatura, presión, velocidad y dirección del viento, factores que afectan directamente el grado de dispersión de MP en la zona, por lo que utilizar un modelamiento de dispersión del contaminante podría servir para especificar de mejor manera éstas condiciones en puntos específicos en vez de simplemente utilizar la estación de monitoreo como guía para la totalidad de la comuna. Dicho sea, la estación de monitoreo, a diferencia de la torre, está ubicada cercanamente a dos zonas de considerable altitud que podrían afectar de alguna manera al campo de vientos que transitarían alrededor de la estación de monitoreo (el Cerro Blanco y el cerro San Cristóbal), por lo tanto, estas observaciones a modo de hipótesis valen la pena ser mejor identificadas y/o descartadas con un programa de modelación que sea capaz de entregar valores más precisos para las ubicaciones considerando éstos factores geográficos de la zona:

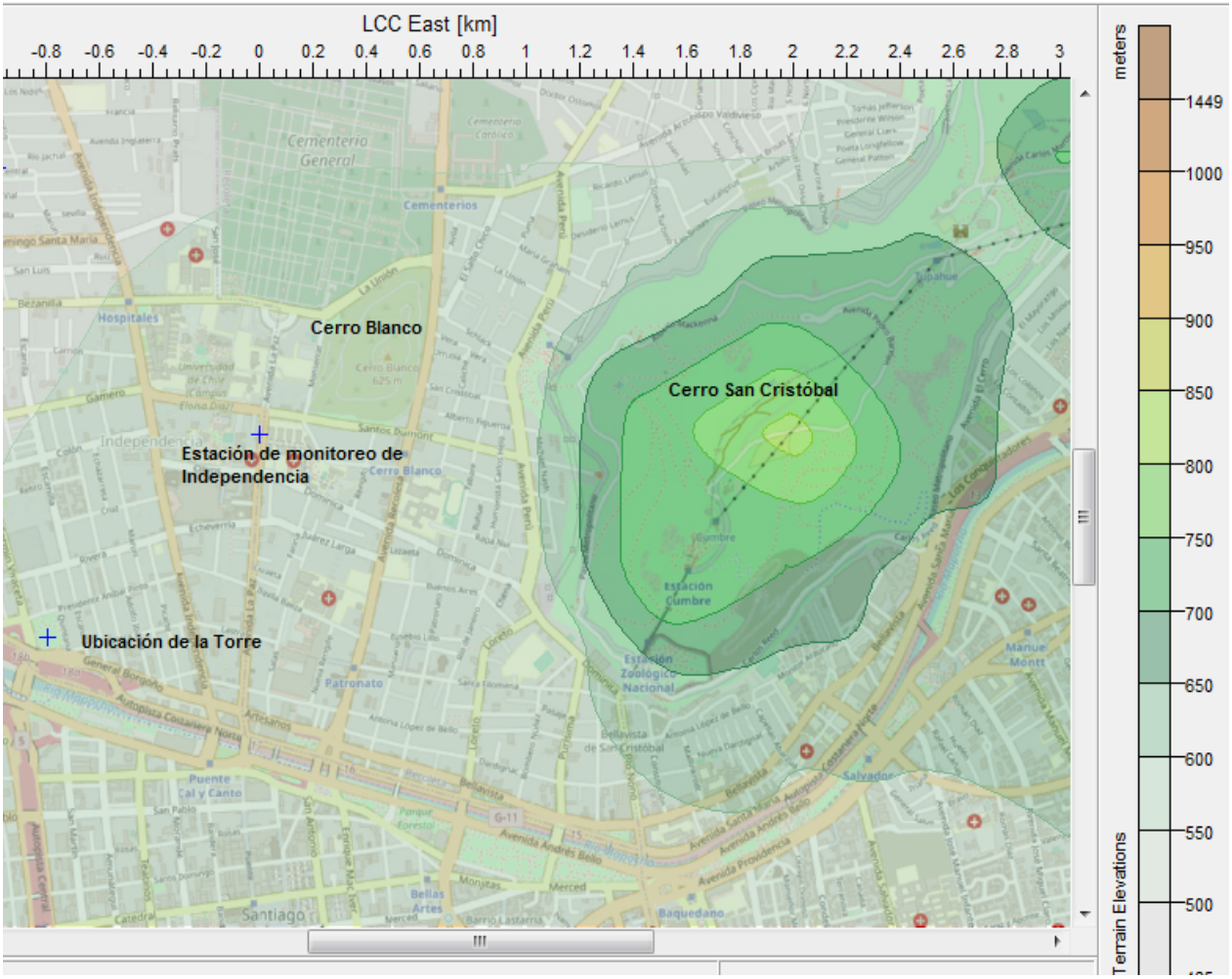


Figura 6.2: Ubicaciones de cerros cercanos a la estación de monitoreo y a la localización del equipo. Fuente: elaboración propia.

- La última observación y quizás la más preponderante en términos de factores que pueden hacer que los niveles de contaminación detectados por la estación y los reales en la localización de la torre presenten diferencias significativas se debe al hecho de que la plaza en la cual se planea instalar el equipo está prácticamente al lado de la Autopista Central y la Autopista Costanera Norte, específicamente a una distancia de aproximadamente 100 [m]. En términos de MP se presentó anteriormente que el sector vehicular es una de las 3 principales fuentes de mayor aporte de MP hacia la atmósfera, y según el informe trimestral de coordinación de concesiones de obras públicas [Ministerio del Obras Públicas, 2017], la Autopista Central fue la autopista urbana más transitada de todo Santiago, con aproximadamente un flujo diario de 1,4 millones de vehículos diarios en el primer semestre del año 2017, seguido por la Autopista Vespucio Sur con 832.000 vehículos por día y en tercer lugar la Autopista Costanera Norte con 786.000 vehículos por día durante el mismo período. Señalado lo anterior, es razonable pensar que la estación de monitoreo al estar alejada de estas grandes calles podría subestimar los valores de MP respecto a los valores en la zona donde estará localizada la torre que es al lado de estas dos autopistas.

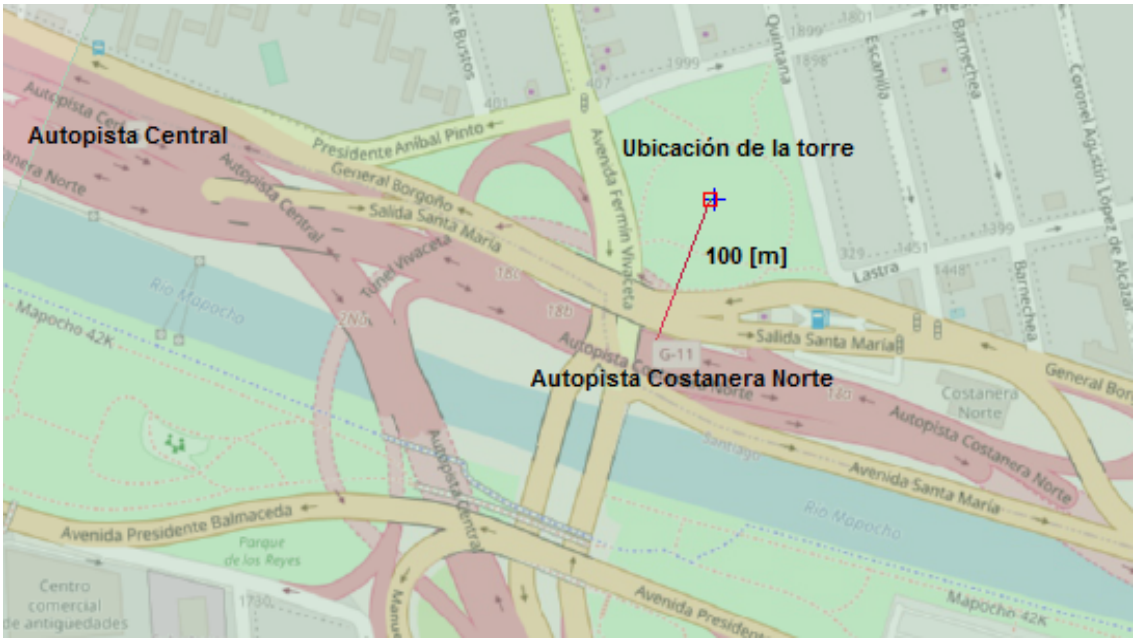


Figura 6.3: Ubicación geográfica de la localización de la torre y su distancia con las Autopistas Central y Costanera Norte. Fuente: elaboración propia.

Mediante modelación de dispersión de contaminantes será posible considerar los 4 factores anteriormente mencionados y se podrá además obtener la variación en los perfiles de concentración de MP entre la distancia desde la estación hasta la ubicación de la torre para corroborar a grandes rasgos si existen diferencias significativas en cuanto a la representatividad de la estación (los factores anteriormente mencionados son especulativos y la demostración amplia y detallada de éstos están fuera del rango de esta investigación, puesto que lo que se busca finalmente con la modelación es obtener valores lo más precisos posibles de los niveles de MP a los que la torre estará expuesta, por lo que es conveniente minimizar posibles errores en vez de utilizar simplemente los valores de la estación de monitoreo de Independencia).

6.3. Programas de modelamiento utilizados en el estudio

De los modelos presentados anteriormente, los modelos de tipo "puff" serán los utilizados en el estudio. Según el SEIA, este tipo de modelos combina los modelos Gaussianos y Lagranjeanos, es decir, primero calculan la dispersión de contaminantes provenientes de una emisión instantánea a lo largo de una trayectoria, considerando las condiciones geográficas y meteorológicas históricas y posteriormente se simula la trayectoria y dispersión Gaussiana de muchos "puffs", es decir, muchas fuentes de tipo continuas.

Dicho lo anterior, se escogió trabajar con el programa Weather Research and Forecasting (WRF®), el cual es un sistema de cálculo e integración numérica para simulaciones atmosféricas. Fue desarrollado por el Centro Nacional para la investigación Atmosférica (NCAR), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NCEP), el Laboratorio de Investigación Naval (NRL) entre otras. Es uno de los sistemas de modelamientos metereológicos de pronóstico más avanzados y completos y actualmente es mantenido por el NCAR y por la administración nacional oceánica y atmosférica (NOAA).

Además de lo anterior el programa ha sido utilizado en numerosos estudios ambientales tales como los realizados por [Martilli and Schmitz, 2007] [Jorquera-Fontena and Orrego, 2010] [Villarroel et al., 2010] [Schmitz et al., 2008] [Comisión Nacional de Energía, 2009], así como también en informes finales para la ex Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) y la Comisión Nacional de Energía (CNE).

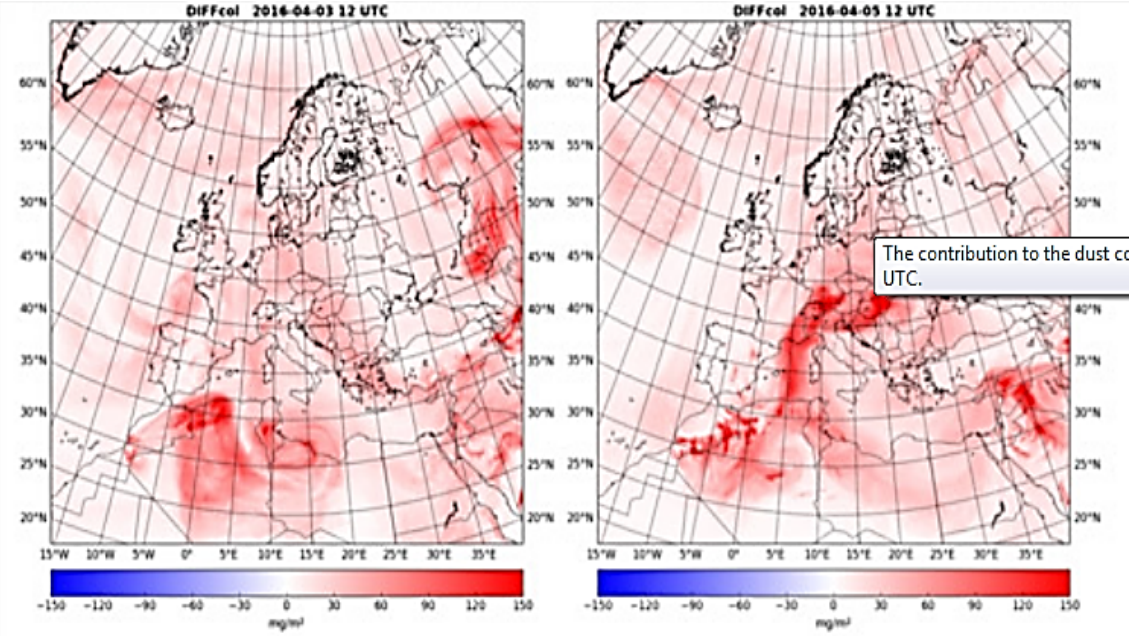


Figura 6.4: Modelamiento entregado por WRF sobre el comportamiento y concentración de las partículas del desierto del Sahara sobre Europa en el año 2018. Fuente: [Baumann-Stanzer et al., 2019].

Para operar, WRF® tiene un sistema de preprocesado (WPS), una inicialización (WRF real.exe), una integración Numérica (wrf.exe) y una visualización final. Estos programas corren en paralelo, requiriendo de un cluster computacional de alta capacidad de cálculo.

Para el procesamiento previo de datos para WRF® (definir dominios geográficos, obtener condiciones iniciales, tamaños adecuados de celdas, etc), el WPS compila los resultados de tres programas:

- WPS Geogrid: Define el dominio de simulación (celdas, tamaño, ubicación resolución horizontal y vertical). Indica además que data geográfica será utilizada y con qué características especiales y elige un tipo de mapa de proyección de los actualmente disponibles (*Lambert conformal, polar stereographic, mercator, lat/lon*).
- WPS Ungrib: Programa que extrae información desde archivos externos obtenidos de NCAR, los cuales son archivos que contienen la información histórica meteorológica de distintas partes del planeta para poder realizar pronósticos y considerar comportamientos de eventos pasados.
- WPS Metgrid: Interpola data externa meteorológica horizontalmente para definir los puntos de la grilla (o el mallado del sector geográfico a modelar).

Una vez compilados los datos de los programas anteriores, WRF real.exe crea niveles verticales para el modelo, interpola la data metereológica para distintas capas o niveles y finalmente crea archivos de entrada para la integración numérica en WRF®. Por último, WRF® aproxima numéricamente las soluciones de las ecuaciones para cada celda del mallado completo para así entregar finalmente un pronóstico y distintos parámetros meteorológicos en función del tiempo que se requiere modelar y para cada celda del sector geográfico seleccionado. Éstos serán la base para poder estudiar el comportamiento de distintos contaminantes atmosféricos cuando se deba cargar el inventario de emisiones y usar el programa CALPUFF®.

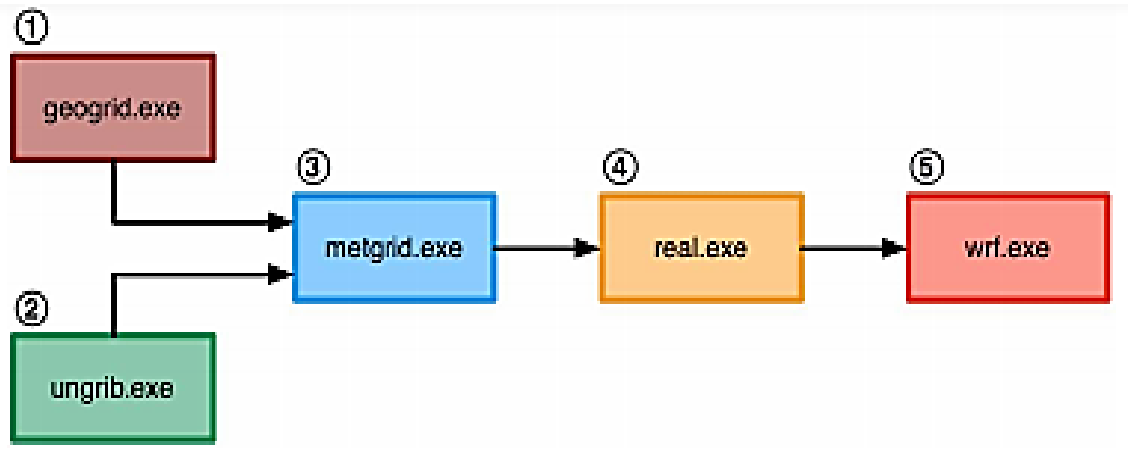


Figura 6.5: Esquema de pasos para operación de WRF. Fuente: elaboración propia.

La utilización del programa WRF requiere utilizar un sistema de clusters computacionales con gran capacidad de procesamiento de condiciones geográficas y metereológicas. Para ésta investigación, se utilizaron los procesadores de la universidad de Tennesse, Knoxville facilitados por convenios con el Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad de Santiago de Chile.

Cabe destacar que la validación del modelo se debe realizar comparando la data histórica de los parámetros meteorológicos con los obtenidos por la corrida inicial de resultados que predice el programa. Para este estudio, se utilizaron los datos registrados en estaciones de monitoreo en tiempo real, es decir, se utilizó la data entregada de la estaciones operantes de la comuna de Independencia y otras estaciones dentro del dominio de modelado y se compararon con los datos facilitados por la plataforma SINCA. Se compararon los parámetros de temperatura, velocidad y dirección del viento considerando el mismo rango temporal y espacial para ambos: modelado en WRF® y SINCA (considerando la estación de monitoreo de Independencia el punto (0,0) en el dominio de modelación).

Posterior al trabajo realizado por WRF®, se prosigue con el programa CALPUFF®, el cual es un programa avanzado de modelación meteorológica y de calidad del aire en estado no estacionario desarrollado por los científicos de Exponent. Es uno de los principales programas preferidos para evaluar transporte a larga distancia de contaminantes y sus impactos en diferentes receptores y está adoptado como programa de modelamiento oficial por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA). Para el caso de Chile, el modelo es recomendado por el MMA en su guía de Modelos de Calidad de Aire del Servicio de

Evaluación Ambiental (SEA).

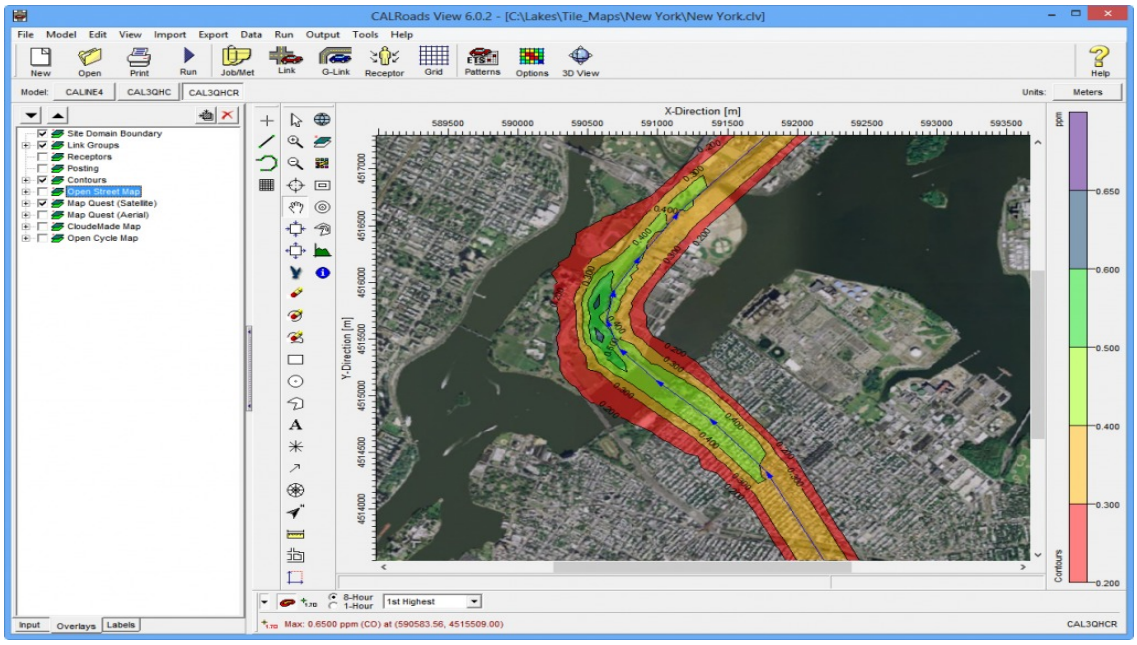


Figura 6.6: Interfaz de CALPUFF para el análisis de una fuente fija y vehicular de emisión MP en la ciudad de Nueva York. Fuente: [Weblakes Software, 2021].

CALPUFF® considera las irregularidades del terreno, modela contaminantes primarios y secundarios con una precisión confiable hasta de 100 [km] además de considerar el tipo de geografía del terreno y los efectos posibles que puedan presentar los edificios y las edificaciones respecto a la dispersión de algún contaminante, y para ello considera parámetros meteorológicos tales como temperatura, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, tipo de suelo, entre otras.

El sistema consta de tres componentes principales y un conjunto de programas de preprocesamiento y post-procesamiento:

- CALMET: Componente que realiza un modelado meteorológico 3D de diagnóstico.
- CALPUFF: Componente que procesa y entrega la dispersión de contaminantes en distintos formatos y a lo largo del sector geográfico (o mallado) escogido.
- CALPOST: Paquete de post-procesamiento de la información modelada.

Para llevar a cabo el modelamiento, CALPUFF® utiliza la información previa de las condiciones geográficas y meteorológicas de distintos programas de preprocesamiento tales como los modelos ETA/NAM y RUC del National Center for Environmental Prediction (NCEP), el modelo RAMS y el modelo WRF (escogido para la actual investigación).

Vale agregar que estos programas de modelación de condiciones metereológicas y geográficas siempre presentan una incertidumbre asociada a su modelación, la cual a lo largo de las últimas décadas se ha ido minimizando en nuevas versiones de los programas, siendo el programa CALPUFF® uno de los más confiables al mezclar al mismo tiempo dos formas de modelación en paralelo.

Este programa últimamente secciona el área geográfica a modelar, separándola por celdas de cierta área superficial escogida y con la capacidad de modelar la concentración de contaminantes a distintos niveles de altura.

Para lograr lo anterior, además de utilizar el preprocesado entregado por WRF (el trabajo previo de integración numérica, delimitación de dominios, condiciones atmosféricas por capas, etc), éste exige cargar el inventario de las distintas fuentes de emisiones del contaminante en la zona a modelar para así resolver ecuaciones diferenciales para cada celda del mallado y obtener finalmente concentraciones de contaminantes para cada zona, sean casos del pasado, o casos predichos en el futuro de este sector geográfico.

6.4. Suposiciones, condiciones y configuración base de la modelación

A continuación se presentan las suposiciones, condiciones y configuración inicial considerada en la programación con WRF® y CALPUFF® para el modelamiento:

Tabla 6.2: Condiciones y configuraciones para el modelamiento utilizado en WRF y CALPUFF®.

Alcance temporal de modelamiento	**31/07/2020 23:00 – 29/08/2020 23:00**
Intervalo de datos considerados	Cada 1 hora
Tipo de Proyección del terreno a modelar	Lambert Conformal
Obtención de data meteorológica histórica	Plataforma NCAR
Principal estación de comparación	Estación Independencia (SINCA)
Dominio de modelación	17 x 17 [km]
Coordenadas de punto central	(punto 0,0 de dominio) LAT 33.422 S – LON 70.651 W
Tamaño de grilla	0.5 [km]
Número de grillas del dominio	1089 (33 X · 33 Y)
Alturas modeladas	10 niveles (10Z) {0, 10, 20, 40, 80, 160, 320, 600 , 1000, 1500 ,2000 [m]}

En lo que respecta al inventario de emisiones que se debe cargar, dentro de CALPUFF se ingresaron las fuentes de la data anteriormente mencionada en la seccion 5.2: emisiones por calles (arcos), fuentes industriales de la zona con información registrada de emisión de MP y se agrega además una fuente areal que contempla un aporte proporcional de MP en la comuna de independencia proveniente de las emisiones residenciales:

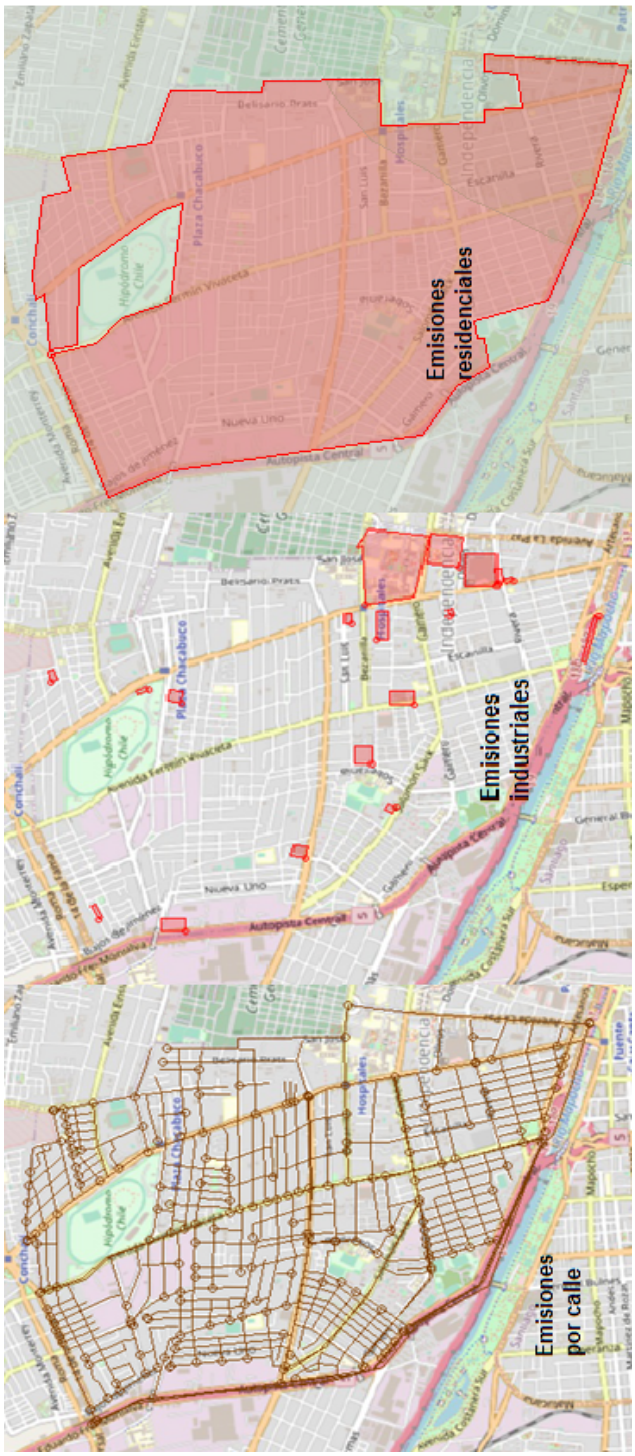


Figura 6.7: Fuentes de emisión de MP consideradas e ingresadas a CALPUFF®. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, antes de comenzar el modelado, se agregaron puntos discretos en el dominio de modelación, los cuales sirven para entregar posteriormente la información de temperatura, velocidad y dirección del viento, altura de mezcla y la concentración de MP en ésas ubicaciones. La ubicación del punto 2, corresponde a la ubicación de la estación de monitoreo de Independencia (de la cual, los resultados de modelación de ésa zona se deben comparar con

los datos monitoreados reales que entrega SINCA para así validar la la modelación y hacer las correcciones correspondientes). La ubicación del punto 1 corresponde a la zona donde se instalaria hipotéticamente la torre de captación de MP, por lo que los valores entregados en ésa zona por el modelado serán los niveles teóricos de MP a la cual la torre estaría expuesta y además corresponderán a los utilizados posteriormente en las FDR , mientras que los valores de temperatura, velocidad y dirección del viento y altura de mezcla indicarán el comportamiento meteorológico a la cual la torre se expondrá teóricamente. El resto de los puntos discretos son para visualizar complementariamente los niveles de MP a los que está expuesta la comuna de Independencia a modo complementario:

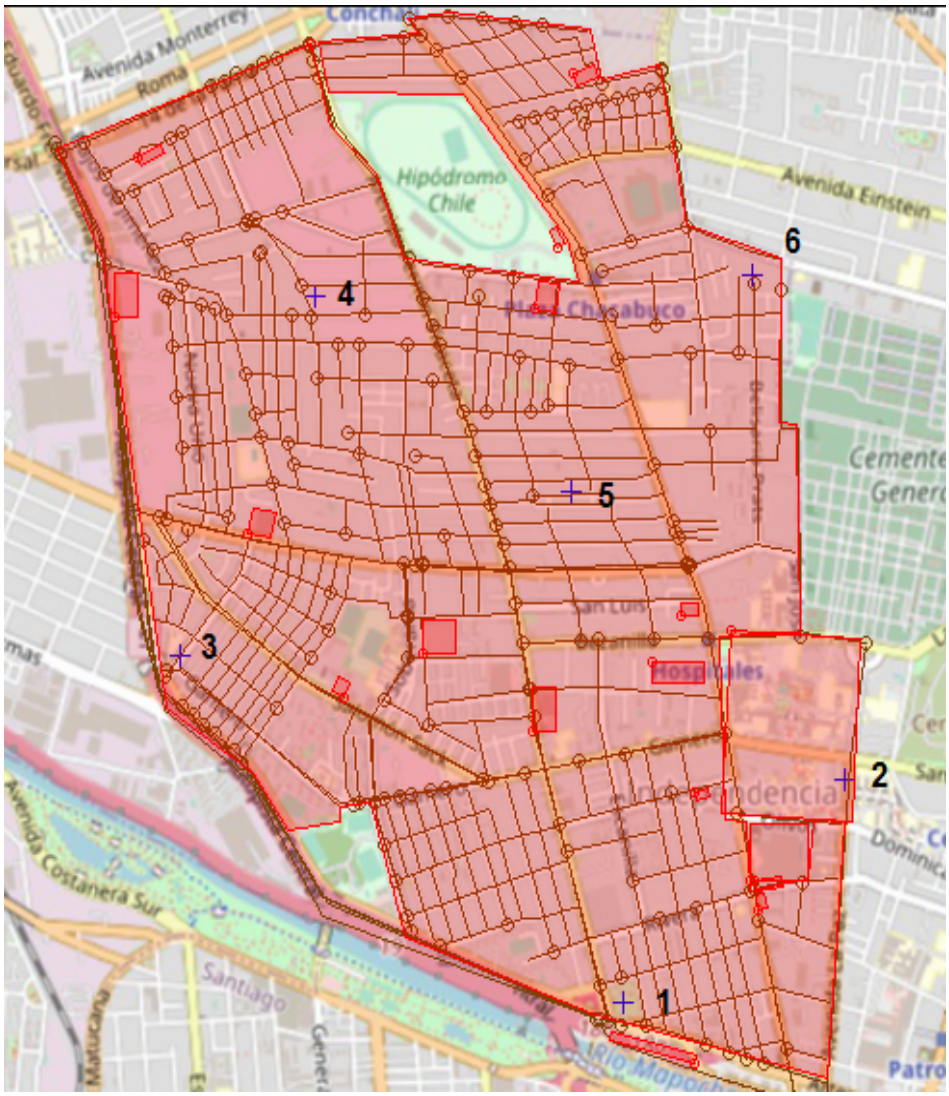


Figura 6.8: Zona modelada en CALPUFF® considerando las fuentes de emisión de MP y puntos discretos que recolectarán la data de niveles de MP y condiciones meteorológicas terminada la modelación. Fuente: elaboración propia.

Capítulo 7

Resultados y discusión

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los puntos discretos 2 y 1 (estación de monitoreo y zona de ubicación de torre respectivamente), considerando sólo el material particulado y el primer nivel o la primera capa de altura desde el piso, correspondiente a los primeros 10 [m] de altura. Las variables meteorológicas modeladas de temperatura, velocidad, dirección de viento y altura de mezcla tanto de la estación de monitoreo como de la zona donde se encuentra la torre se encuentran en el Anexo H.

En las gráficas se agregan además los niveles de concentración recomendadas por las normas. Se presenta además una gráfica con el perfil variación de concentración promedio de MP10 y MP2.5 entre la estación de monitoreo y la zona de la torre para una hora puntual (punto discreto 2 y 1), para ver más perfiles de variación de concentración en distintas horas a lo largo del tiempo de modelación, revisar Anexo H.

Adicionalmente se presenta el dominio modelado junto con los respectivos perfiles de niveles de MP en distintos horarios junto con los respectivos puntos discretos, el grillado, el campo de vientos, perfiles geográficos de altura y las fuentes de emisión consideradas dentro del dominio.

7.1. Resultados de modelación

Resultados punto discreto 2 (zona de estación de monitoreo de Independencia):

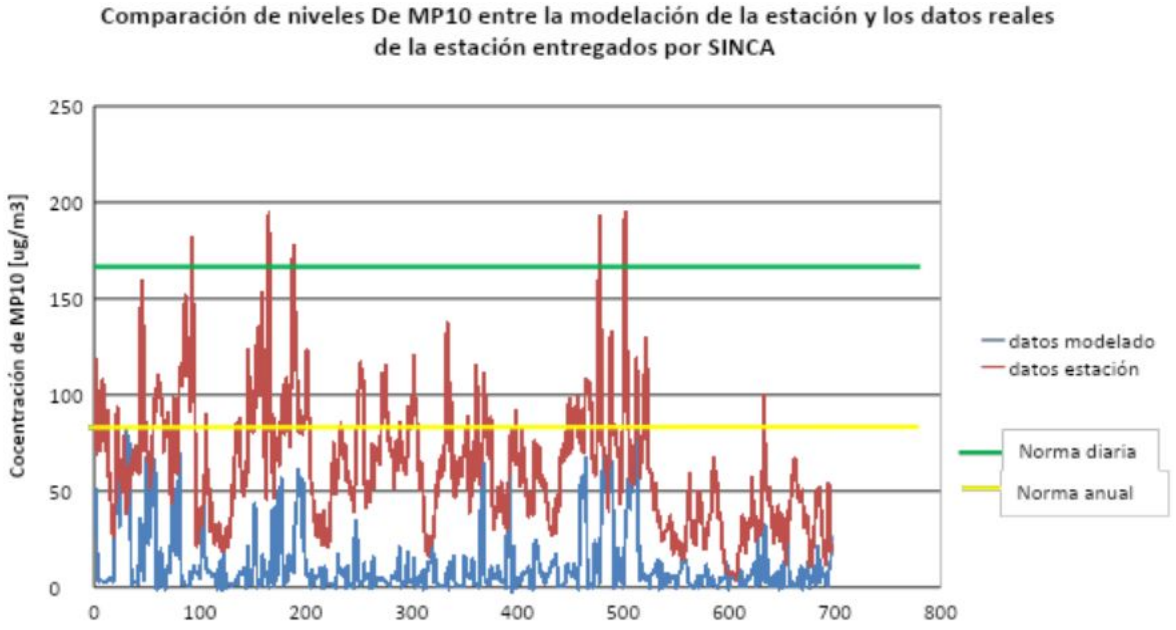


Figura 7.1: Niveles de MP10 entregados por SINCA y modelados por WRF® y CALPUFF® durante el mes de agosto, con los respectivos niveles recomendados por la normativa nacional. Fuente: elaboración propia.

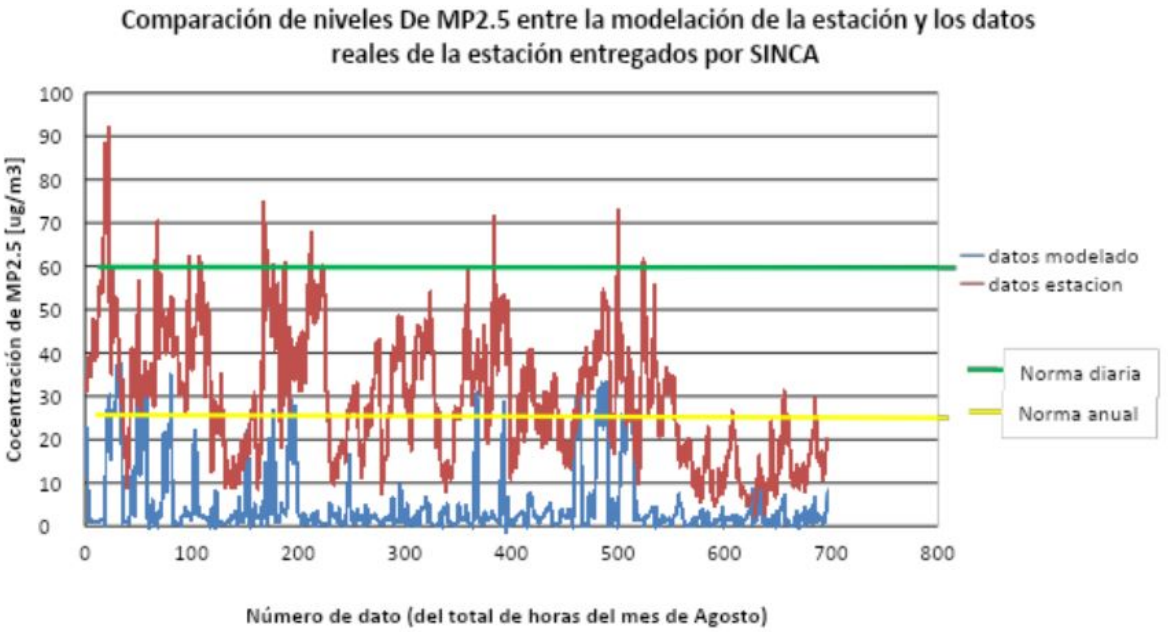


Figura 7.2: Niveles de MP2.5 entregados por SINCA y modelados por WRF® y CALPUFF® durante el mes de agosto, con los respectivos niveles recomendados por la normativa nacional. Fuente: elaboración propia.

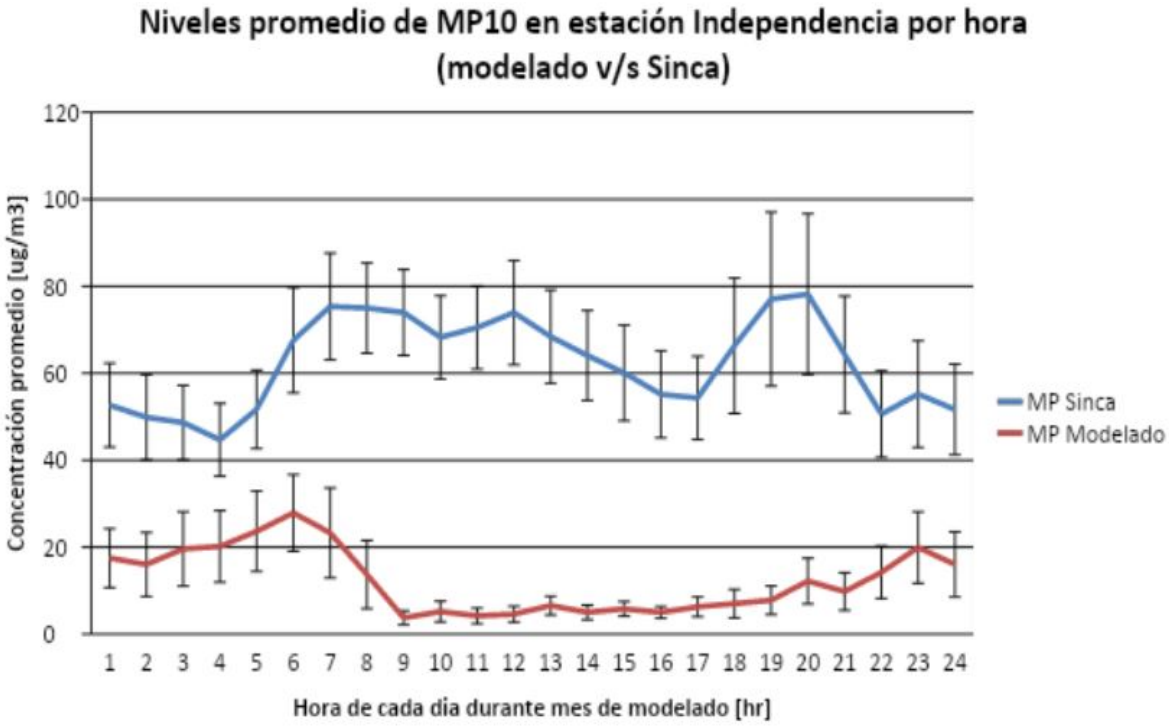


Figura 7.3: Niveles de MP10 entregados por SINCA y modelados por WRF® y CALPUFF® durante el mes de agosto, agrupados en promedios diarios con sus respectivos intervalos de confianza. Fuente: elaboración propia.

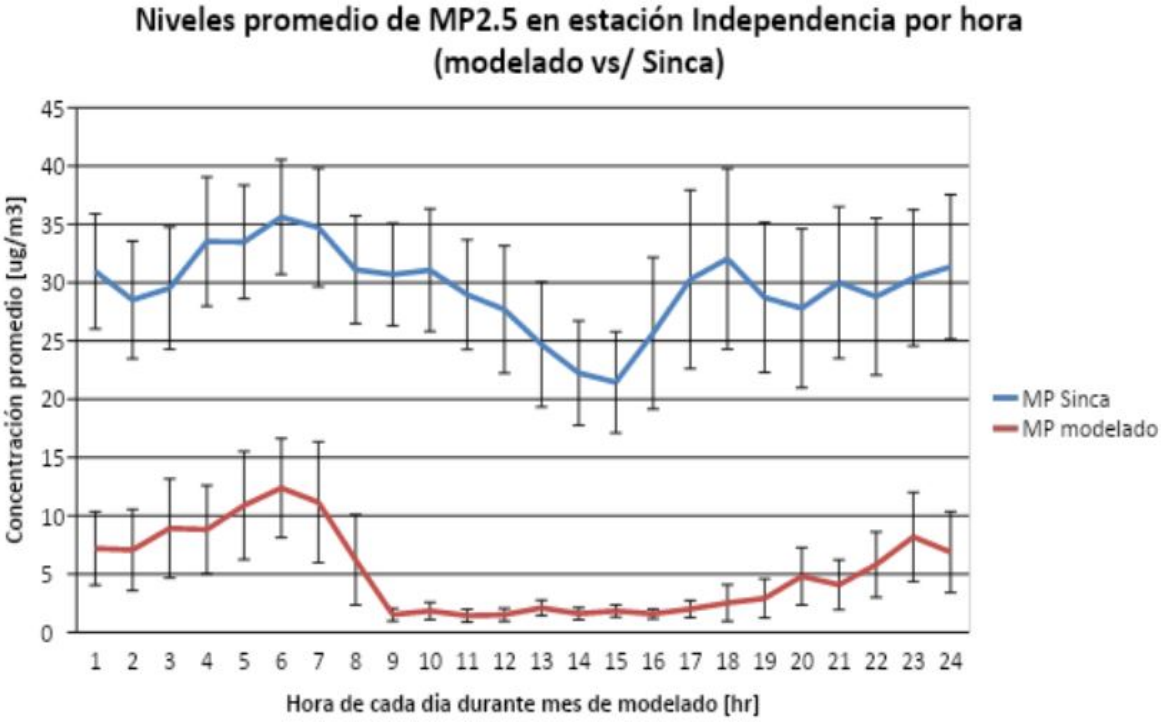


Figura 7.4: Niveles de MP10 entregados por SINCA y modelados por WRF® y CALPUFF® durante el mes de agosto, agrupados en promedios diarios con su respectivos intervalos de confianza. Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.1: Tabla de estadísticas de datos observados y datos predichos por el modelo para la estación de monitoreo de Independencia. $\bar{O}$ corresponde a la media observada (en [ug/m^3]), $\bar{E}$ corresponde a la media del modelo, $\sigma_{\bar{O}}$ y $\sigma_{\bar{E}}$ son las desviaciones estándar, MAE el error medio absoluto, RMSE el error cuadrático medio y r el coeficiente de correlación.

Estación	$\bar{O}$	$\bar{E}$	$\sigma_{\bar{O}}$	$\sigma_{\bar{E}}$	**MAE**	**RMSE**	**r**
Independencia (MP10)	62.39	12.31	32.00	16.83	50.58	60.07	0.19
Independencia (MP2.5)	29.55	5.14	15.11	8.05	24.55	28.63	0.28

Obtenida la modelación, cualitativamente se observa un comportamiento esperado en términos de en qué horas del día la dispersión de MP es baja, esto ocurre aproximadamente en horario nocturno, entre las 21:00 PM y las 5 AM, tanto para el MP10 como para el MP2.5, lo que en términos de comportamiento del MP se corrobora con lo predicho en diferentes estudios realizados en Santiago para distintos contaminantes. Por una parte, durante el día, el nivel de la capa de mezcla se mantiene a mayor altura gracias a la radiación solar, mientras que los campos de viento que circulan en la zona son mayores, por lo tanto, la dispersión está mayormente favorecida, sin embargo, llegando al período nocturno, donde los campos de viento disminuyen de intensidad y la temperatura también disminuye (provocando un descenso en el nivel de capa de mezcla) la dispersión del MP se ve desfavorecido, por lo que todo ese MP producido durante el día por las distintas fuentes del dominio comienza a descender o "estancarse" en el sector. Además de lo anterior, las zonas más cercanas a fuentes constantes de emisión como las zonas cercanas a las grandes autopistas sufren una exposición a niveles mayores de MP ya que como se estableció anteriormente, los vehículos son una de las 3 mayores fuentes de emisión de MP en ciudades altamente urbanizadas.

Cuantitativamente es posible observar que para los valores de MP10 y MP2.5 indicados por la estación de monitoreo de Independencia real versus la estación de monitoreo modelada existe un sub-dimensionamiento por parte de ésta última, en ambos casos, los valores entregados por el modelado con WRF® y CALPUFF® son inferiores a lo largo de todas las horas de todo el período modelado, alcanzando errores cuadráticos medios de 60.07 % para MP10 y 28.63 % para MP2.5 con unos coeficientes de correlación muy bajos. Adicionalmente, los promedios simples de concentración del período también son menores respecto a lo que indican las estaciones en la realidad así como también ambas presentan un bajo coeficiente de correlación.

Según el estudio realizado por [Saide P., 2008], existen flujos de vientos que recorren el valle de la Región Metropolitana provenientes del suroeste y en periodos de invierno además se agregan vientos de dirección noroeste, lo que provoca una condición desfavorable para la dispersión de contaminantes en la zona centro y noroeste de la capital. Previo a la modelación, cuando se estudió el inventario de emisiones a utilizar, se tenía ausencia de una información vital, y es el hecho de que el modelado no considera los aportes de emisiones de MP que viajan desde otras comunas de la ciudad de Santiago hacia la zona de modelado, esto es un factor crítico a considerar debido a que siempre se estará sub-dimensionando la concentración de MP a la cual se someterá la zona lo que sumará mayor incertidumbre además de los errores propios en la estimación del inventario de emisiones del sector. Para futuras investigaciones sería de gran utilidad saber cuánto "flujo" de MP ingresa al dominio de modelación para que así los programas avanzados de dispersión de contaminantes puedan entregar valores

más acordes a la realidad, sin embargo esos valores, así como la forma de ingresarlos en las "fronteras" del dominio están fuera del alcance de ésta investigación. Considerando esto, y los comportamientos meteorológicos propios de la zona, es de esperar que la zona centro y noroeste de la capital termine comportándose como una zona "sumidero" de MP, sobre todo en épocas frías donde el nivel de altura de mezcla desciende y provoca una mayor concentración de contaminante a la altura de las calles.

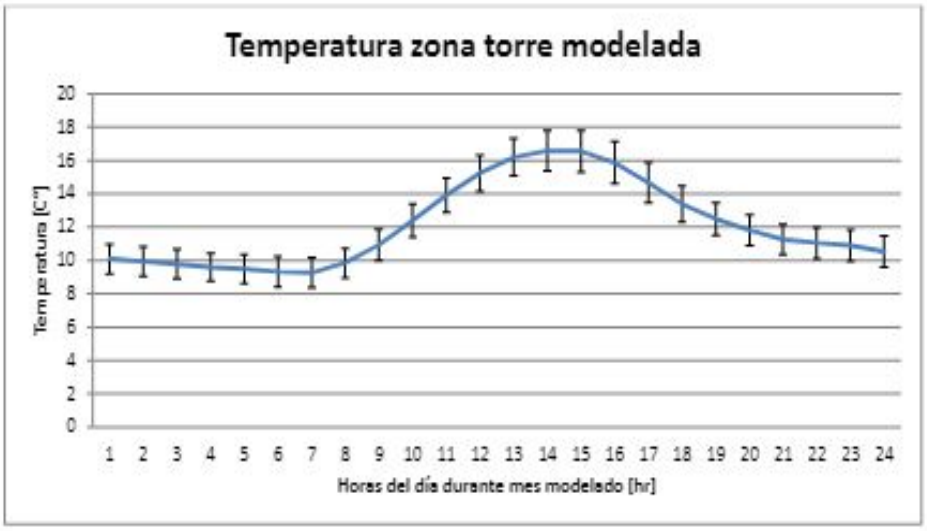


Figura 7.5: Gráfica de temperatura obtenida en el punto de torre por modelación. Fuente: elaboración propia.

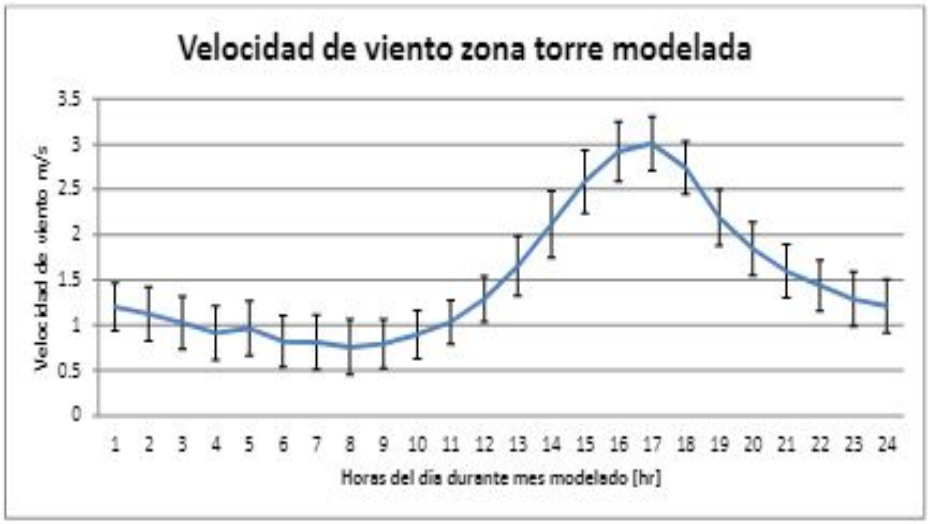


Figura 7.6: Gráfica de velocidad de viento obtenida en el punto de torre por modelación. Fuente: elaboración propia.

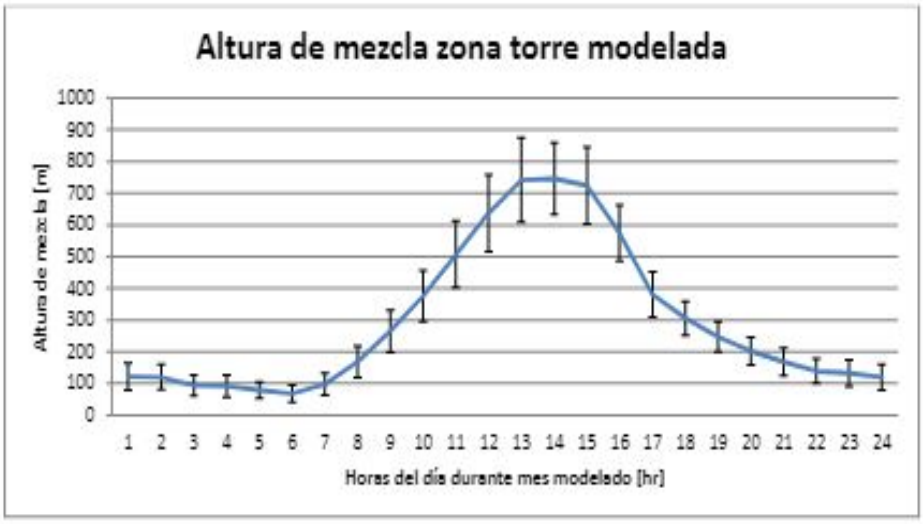


Figura 7.7: Gráfica de altura de mezcla obtenida en el punto de torre por modelación. Fuente: elaboración propia.

Respecto al comportamiento metereológico, las temperaturas registradas presentan comportamientos similares tanto para los datos reales entregados por la RED-MACAM como para el modelamiento, sin embargo tal como se estipuló, si hay una diferencia entre los valores de MP detectados a distintas horas del día entre el punto de la estación modelada y el punto de ubicación del equipo (ver gráficas de altura de mezcla, velocidad de viento y temperatura de la zona modelada en Anexo H). Además de lo anterior el programa WRF® sobredimensionó las magnitudes de los campos de viento, no considerando por ejemplo un campo de vientos desde el sur (Ver roza de los vientos en Anexo I), por lo que éste es otro factor a agregar en cuanto a la diferencia en los valores de concentraciones reales versus las modeladas puesto que tal como se mencionó anteriormente, la dirección y magnitud del campo de vientos es uno de los factores meteorológicos claves en cuanto a dispersión de contaminantes atmosféricos. Según los valores obtenidos, los errores de predicción entre los valores de MP indicado por el modelo y el valor real son los siguientes:

Tabla 7.2: Tabla de porcentaje del total numérico de los datos modelados cada hora y el porcentaje de error de predicción que estos presentan respecto al valor real.

Error real vs modelo	**PM10**	**PM2.5**
Valores con error menor o igual a 5 %	4.2 %	2.2 %
Valores con error menor o igual a 25 %	15.4 %	9.2 %
Valores con error menor o igual al 100 %	66.9 %	65.3 %
Valores con error de 100 % o mayor	13.6 %	23.4 %

De la Tabla 7.2 se puede apreciar que sólo un 4,2 % de los valores de MP10 y un 2,2 % del MP2.5 respecto a la totalidad de datos modelados (697) presentan un error menor al 5 % de predicción con los valores entregados por la estación de monitoreo real, mientras que la mayoría de los datos modelados, presentan un error menor o igual al 100 %.

Finalmente, a pesar del sub-dimensionamiento en los niveles de MP en la zona, se puede observar según las Figuras 7.12 y 7.13 que el perfil de concentraciones entre la ubicación de la estación y la ubicación del equipo es frecuentemente distinto, sin embargo no siempre se comporta de la misma forma, para cada hora durante el período modelado, se obtuvieron distintos perfiles de MP entre ambas zonas, lo que sugeriría inicialmente y a grandes rasgos que los niveles detectados por la estación de monitoreo no son del todo representativos para la zona de la torre por lo que suponer que éstos valores serían idénticos a los valores a los que se expondrá el equipo, conllevaría a otro error (Ver en Anexo H otros perfiles a distintas horas y distintos días).

Cuando se realizan modelamientos predictivos de contaminantes atmosféricos con programas de modelación por "mallado", se espera contar con valores meteorológicos iniciales y valores de inventarios de emisiones precisos y actualizados que contribuyan a que los datos entregados por el modelado sean lo más precisos posibles, sin embargo es razonable pensar que el comportamiento meteorológico es indiferente del inventario de emisiones de la zona a modelar, es decir, los fenómenos meteorológicos ocurren de manera independiente, mientras que el comportamiento de la concentración de contaminantes atmosféricos es afectado por estos fenómenos, siendo éste último una variable dependiente de los fenómenos meteorológicos y geográficos. Observando los resultados preliminares, y considerando la fundamentación previa respecto a contribución de posible MP desde otras comunas aledañas a Independencia, es acertado pensar que para la modelación realizada, el inventario de emisiones real al que está expuesta la zona de modelación es significativamente distinto y/o mayor al disponible para modelar.

Resultados punto discreto 1 (zona de ubicación de la torre):

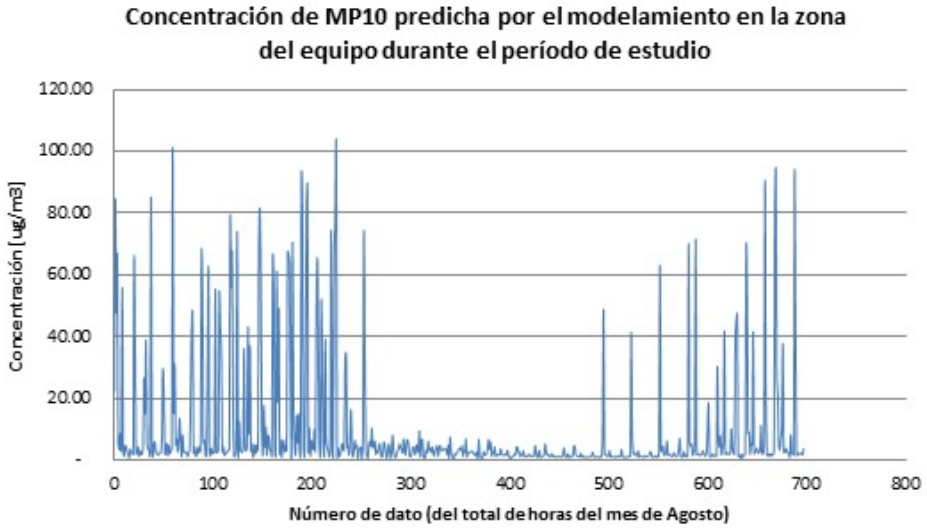


Figura 7.8: Niveles de MP10 modelados durante el mes de agosto, para la zona de la torre. Fuente: elaboración propia.

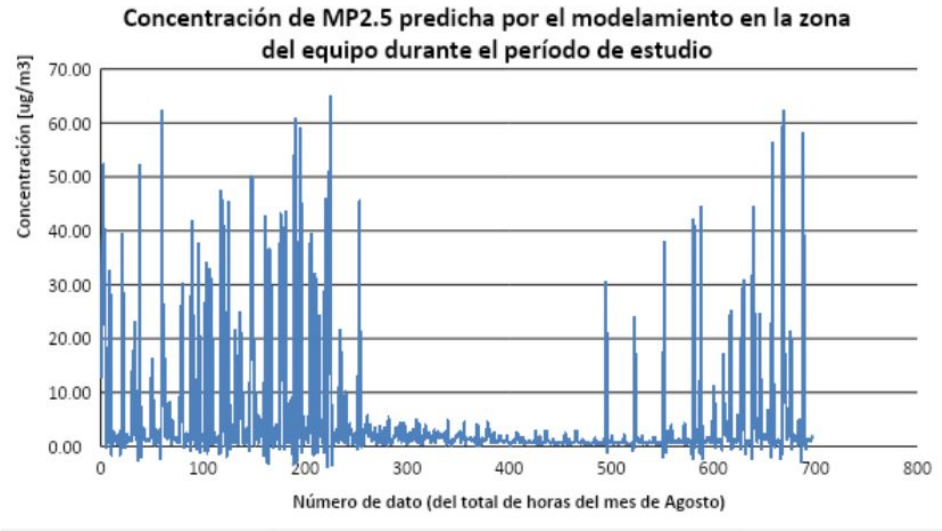


Figura 7.9: Niveles de MP2.5 modelados durante el mes de agosto, para la zona de la torre. Fuente: elaboración propia.

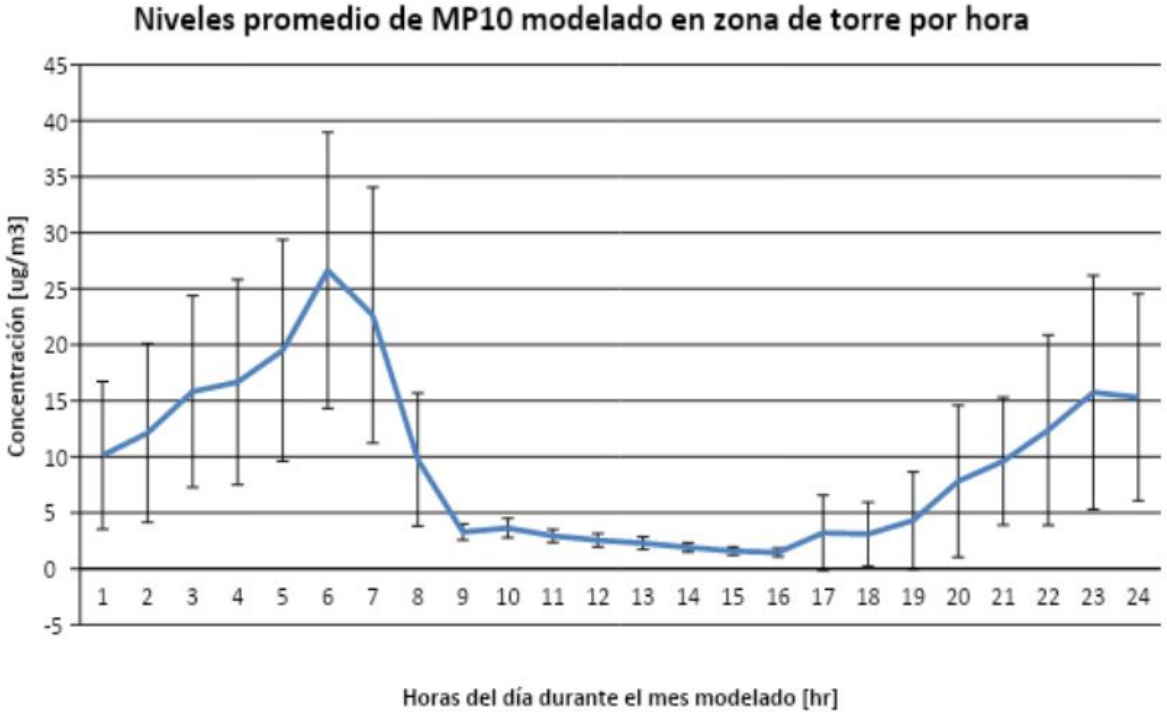


Figura 7.10: Niveles de MP10 entregados por SINCA y modelados por WRF® y CALPUFF® durante el mes de agosto, agrupados en promedios diarios. Fuente: elaboración propia.

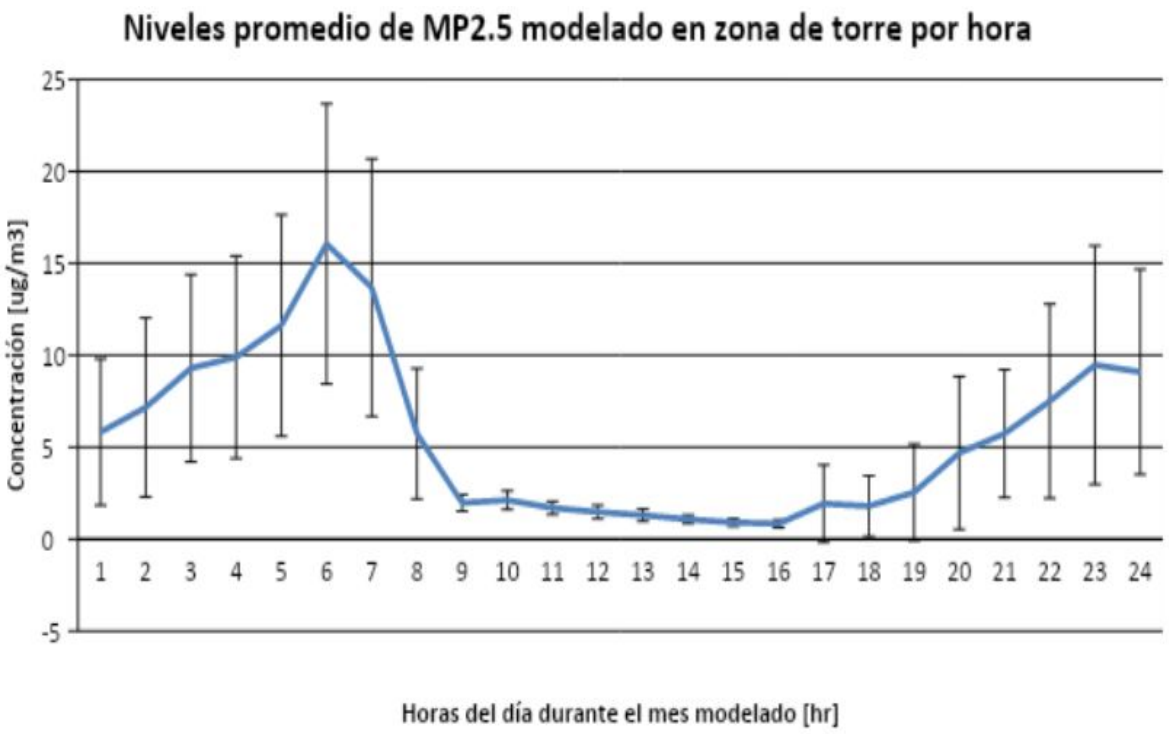


Figura 7.11: Niveles de MP2.5 entregados por SINCA y modelados por WRF® y CALPUFF® durante el mes de agosto, agrupados en promedios diarios. Fuente: elaboración propia.

Perfil de variación de niveles de MP entre la estación de monitoreo y la zona de la torre.

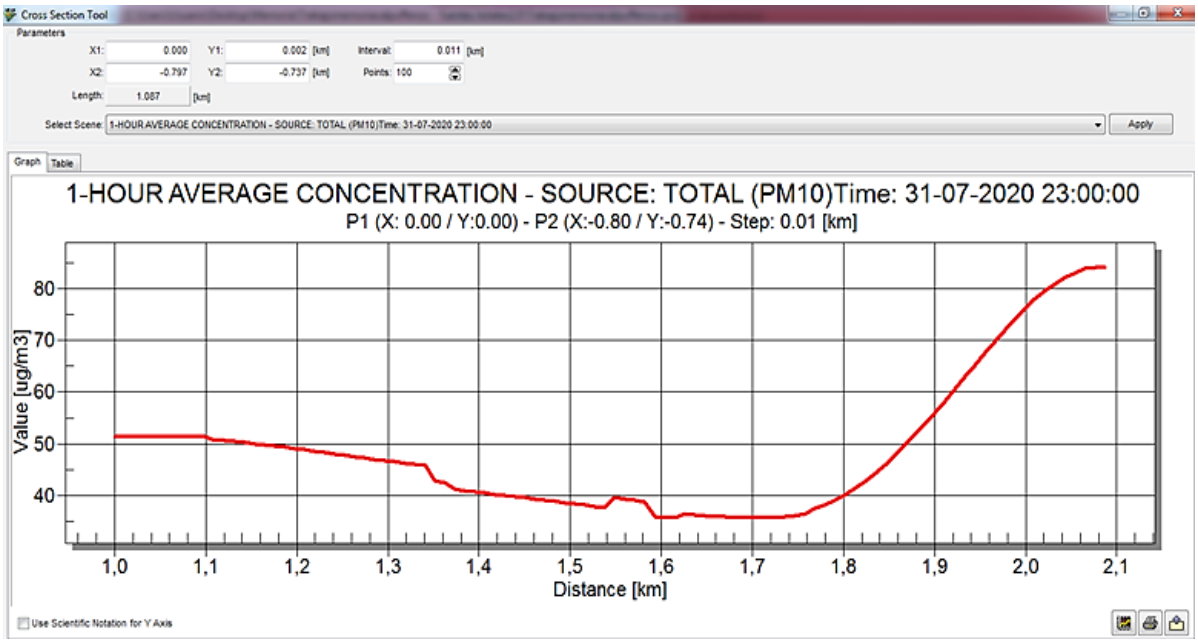


Figura 7.12: Perfil de variación de concentración de MP10 entre la estación de monitoreo (punto discreto 2) y la zona de la ubicación de la torre (punto discreto 1) para el dia 31/07/2020 a las 23:00 [pm]. Fuente: elaboración propia.

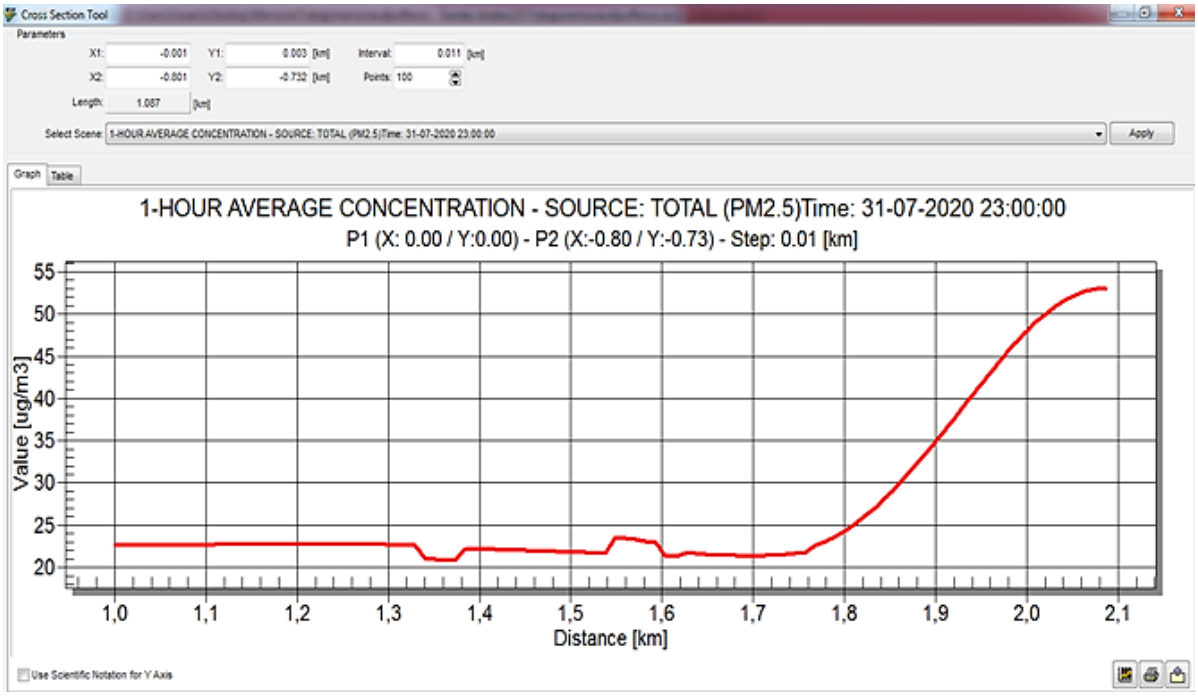


Figura 7.13: Perfil de variación de concentración de MP2.5 entre la estación de monitoreo (punto discreto 2) y la zona de la ubicación de la torre (punto discreto 1), para el dia 31/07/2020 a las 23:00 [pm]. Fuente: elaboración propia.

Observando la gráfica anterior y en términos prácticos, es evidenciable el hecho de que los valores entregados en el modelo de la estacion versus en la ubicación de la torre serian diferentes, tal como se expuso en el capítulo 6, existen multiples factores que pueden presentar una diferencia en las concentraciones de MP en la zona de la torre, por lo que para mayor presición, se comprueba a primeras instancias que la metodología ayudará de mejor manera a obtener la concentración real en el punto de la torre y para éso, en esta investigación será necesario un ajuste de valores justificado. Prosiguiend, de los valores entregados por la zona de la torre en cuanto a MP (punto discreto 1) podrían utilizarse directamente en las FDR si los valores entregados por el modelado para el punto discreto 2 (zona de estación de monitoreo) hubieran sido representativos y mayormente similares a los valores reales entregados por la estación de monitoreo, es decir, si estos dos últimos valores entre data real y modelación presentan errores medios absolutos menores al 20 % la modelación podría considerarse precisa fiable y calibrada a la realidad para cualquier otro punto de interés en el resto del dominio (según los lineamientos del SEA). Para los casos como este, el MMA en su guía AGIES, establece que para cualquier tipo de programa de modelación de dispersión de contaminantes, es posible realizar un ajuste entre los valores obtenidos por la modelación misma y los valores reales con los cuales se contrastarán (para éste caso, los valores entregados en la red MACAM por la estación de monitoreo en la comuna de Independencia). Este ajuste o factor de corrección relaciona el percentil 98 de los datos obtenidos, tanto los modelados en la estación como los reales de la estación obtenidos de MACAM, estableciendo un cuociente entre ellos, el cual servirá como factor de corrección para aproximar de mejor manera los datos obtenidos por el modelado a los datos reales de concentración de MP en el sector de interés:

$$\alpha_{factor\ \text{de}\ correcci\acute{o}n} = \frac{Percentil\ 98\ \text{de}\ datos\ reales}{Percentil\ 98\ \text{de}\ datos\ modelados} \tag{7.1}$$

Dicho de otra manera, éste coeficiente de corrección permitirá ajustar los valores de MP a los cuales la torre se expondrá, pasando de valores subestimados a valores más reales según los datos monitoreados:

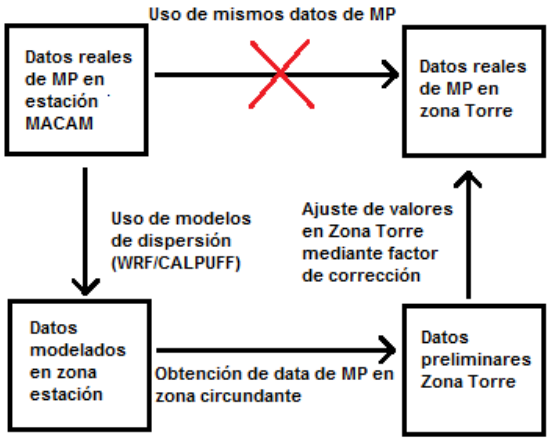


Figura 7.14: Metodología para obtención de datos más ajustados a la realidad.

Según la información disponible, se tiene entonces:

Tabla 7.3: Percentiles de los valores de MP10 modelados y de la red MACAM, y el factor de corrección alfa.

	MP10 MACAM	**MP10 Modelado**	**Factor de corrección**
Percentil 98	141.12	60	2.352

Tabla 7.4: Percentiles de los valores de MP2.5 modelados y de la red MACAM, y el factor de corrección alfa.

	MP2.5 MACAM	**MP2.5 Modelado**	**Factor de corrección**
Percentil 98	63.06	30	2.102

Con el factor de corrección, es posible corregir los valores modelados para la estación de monitoreo y los valores de MP que se utilizarán finalmente en las FDR:

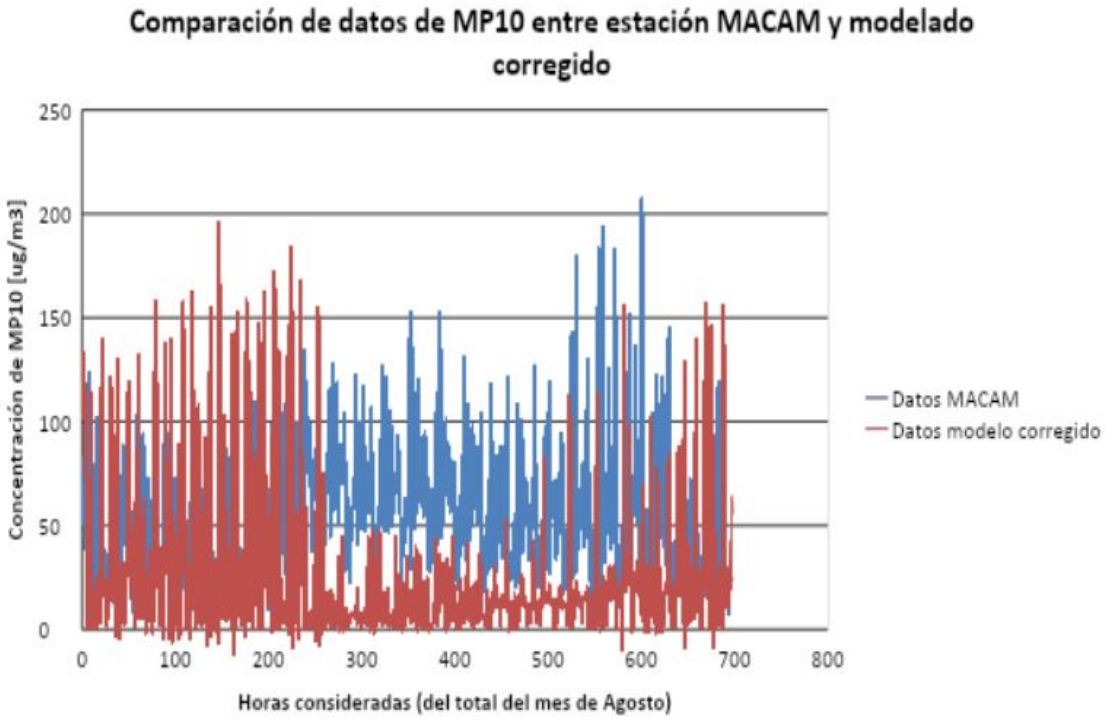


Figura 7.15: Valores de red MACAM para MP10 y valores de MP10 de modelamiento corregido.

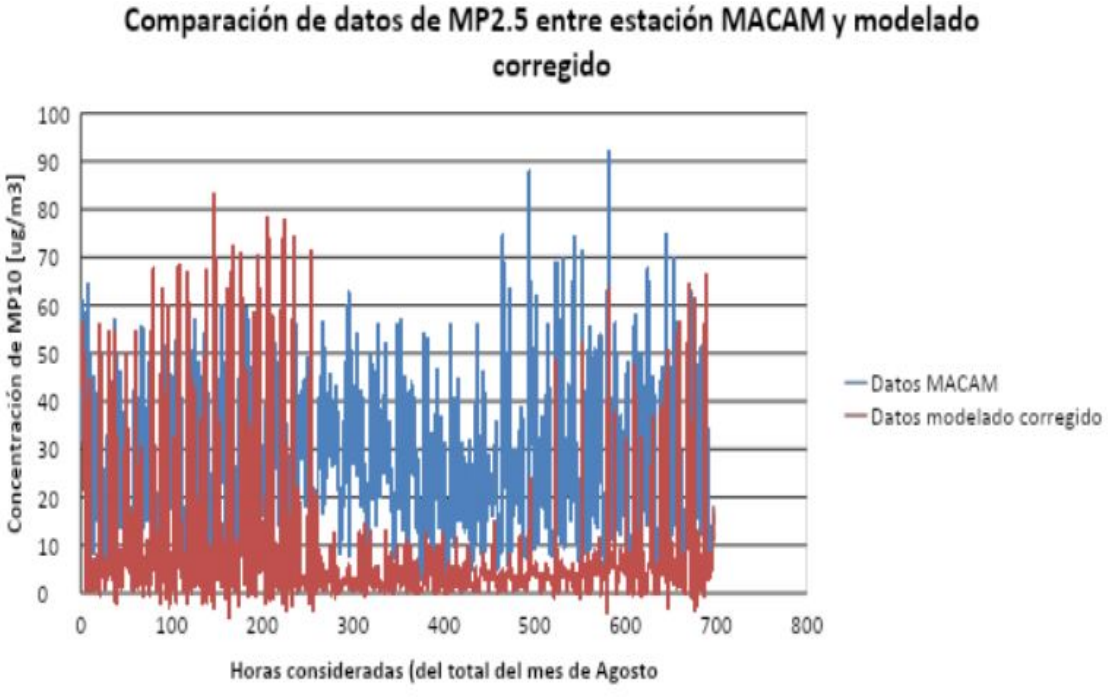


Figura 7.16: Valores de red MACAM para MP10 y valores de MP10 de modelamiento corregido.

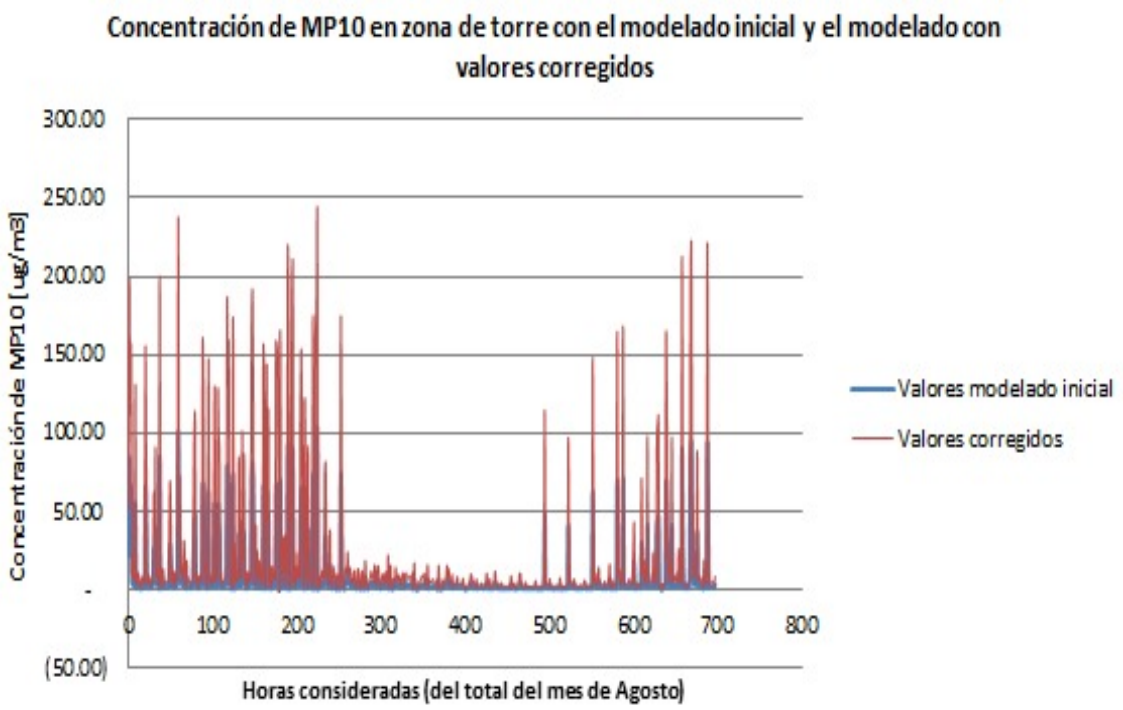


Figura 7.17: Valores de MP10 del modelado inicial y valores de MP10 de modelamiento corregido para la zona de la torre.

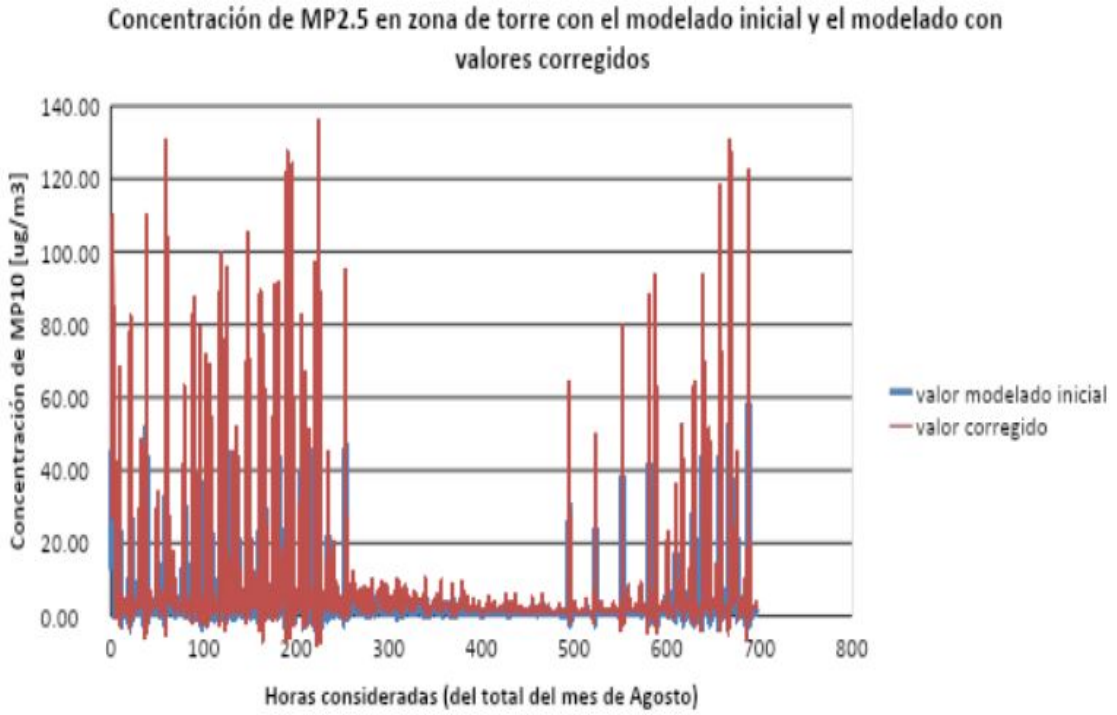


Figura 7.18: Valores de MP2.5 del modelado inicial y valores de MP2.5 de modelamiento corregido para la zona de la torre.

Desde éste punto de vista, los resultados obtenidos estarían subestimando todas las con-

secuencias posibles a la exposición de los habitantes al MP, sin embargo también existe una sobreestimación considerada. A continuación se presentará una tabla resumen de los sub y sobredimensionamientos a tomar en consideración:

Tabla 7.5: Resumen de sub y sobrediemnsionamientos más significativos que posiblemente afectan los resultados obtenidos en las FDR.

Subdimensionamiento de resultados	**Sobredimensionamiento de resultados**
No considerar todas las enfermedades posibles de causa directa por MP	Consideración de que toda la población de la cuadrícula del mallado de modelado está expuesta a la SFT
No considerar enfermedades oportunistas potenciadas por niveles altos de MP	No consideración de eventos que facilitan la limpieza del aire (lluvias)
No considerar aporte de campos vectoriales de MP desde otras comunas ni tampoco la posibilidad de que otros habitantes de otras comunas lleguen al sector	Suposición de eficiencia de captura de MP estable para la SFT
Valores modelados desde las horas numero 250° a 550° del total de las 697° horas modeladas del mes siguen subdimensionados respecto a los valores entregados por la red MACAM a pesar de la corrección (para MP10 y MP2.5)	Se considera un mes históricamente crítico sin embargo no representativo del comportamiento de la totalidad de meses del año, los cuales pueden presentar niveles más bajos de concentración de MP para efectos a largo plazo
Programa WRF® no considera correctamente el flujo de vientos provenientes del sur en el modelado	No se considera factores específicos de la población que ayuden a amortiguar o evitar las aflicciones anteriormente usadas, tales como actividad física o alertas ambientales que avisen a los pobladores para evitar exposición

Capturas en horas fijas del dominio modelado para MP10.

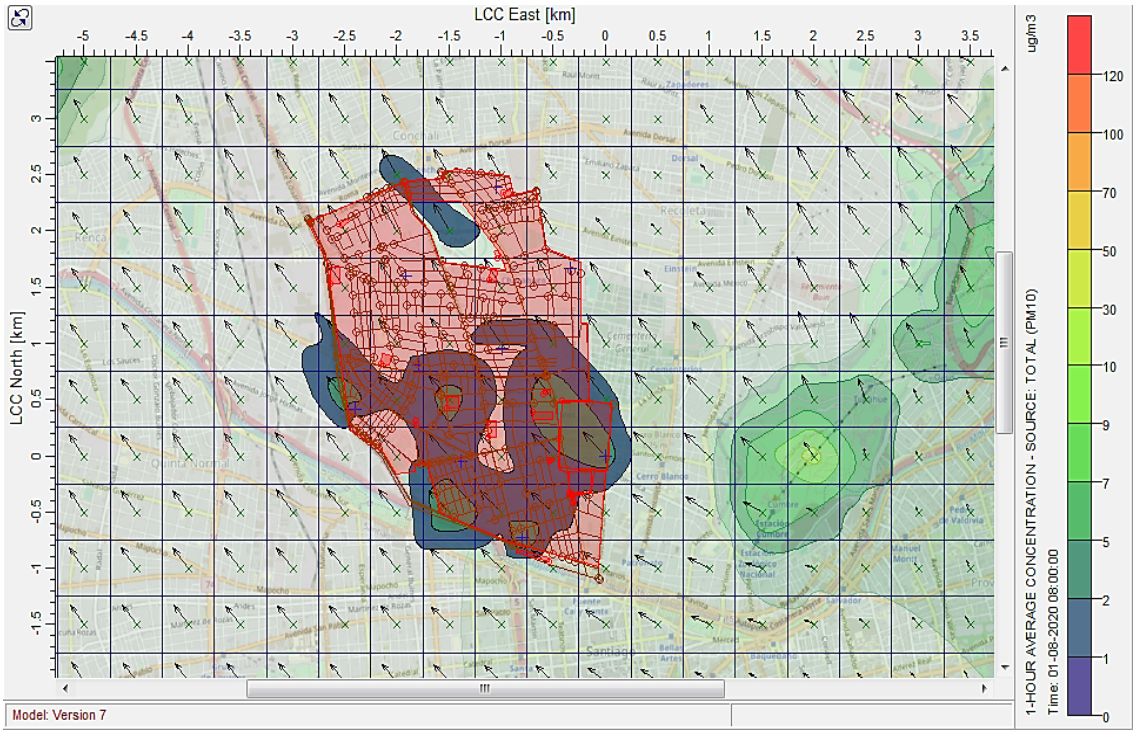


Figura 7.19: Dominio de la zona modelada. El perfil de la concentración de MP10 (también llamada "pluma") corresponde al día 01/08/2020 a las 8:00 am. Fuente: elaboración propia.

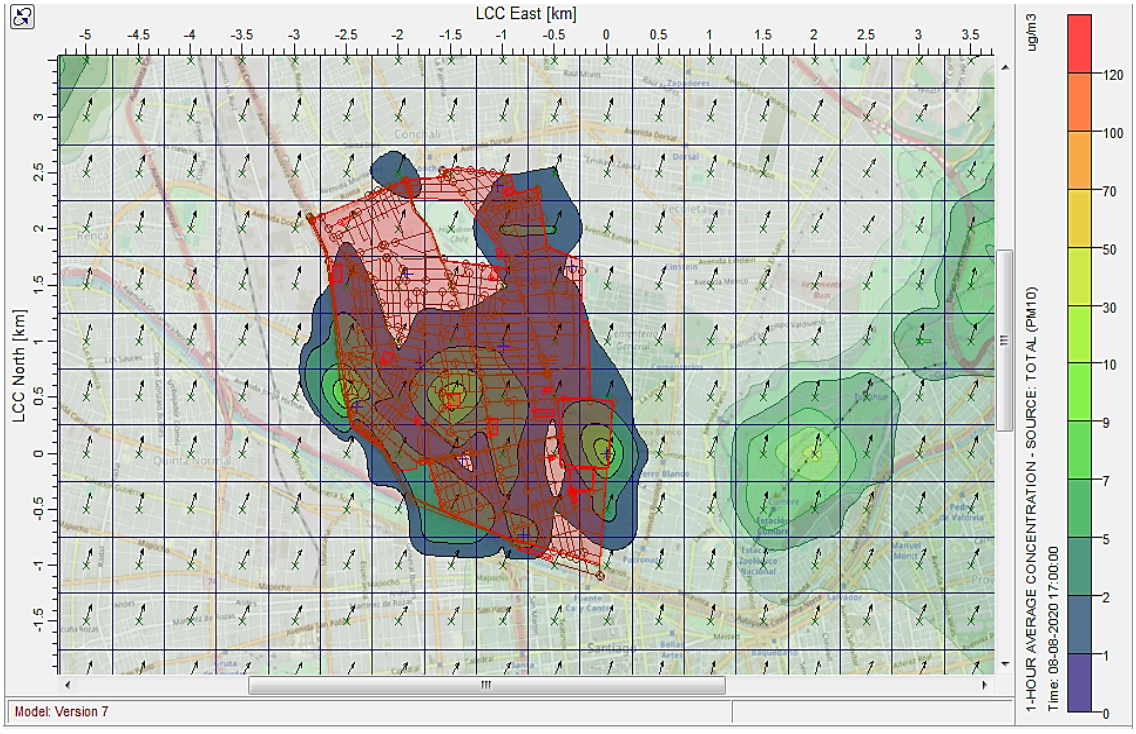


Figura 7.20: Dominio de la zona modelada. El perfil de la concentración de MP10 (también llamada "pluma") corresponde al día 08/08/2020 a las 17:00 pm. Fuente: elaboración propia.

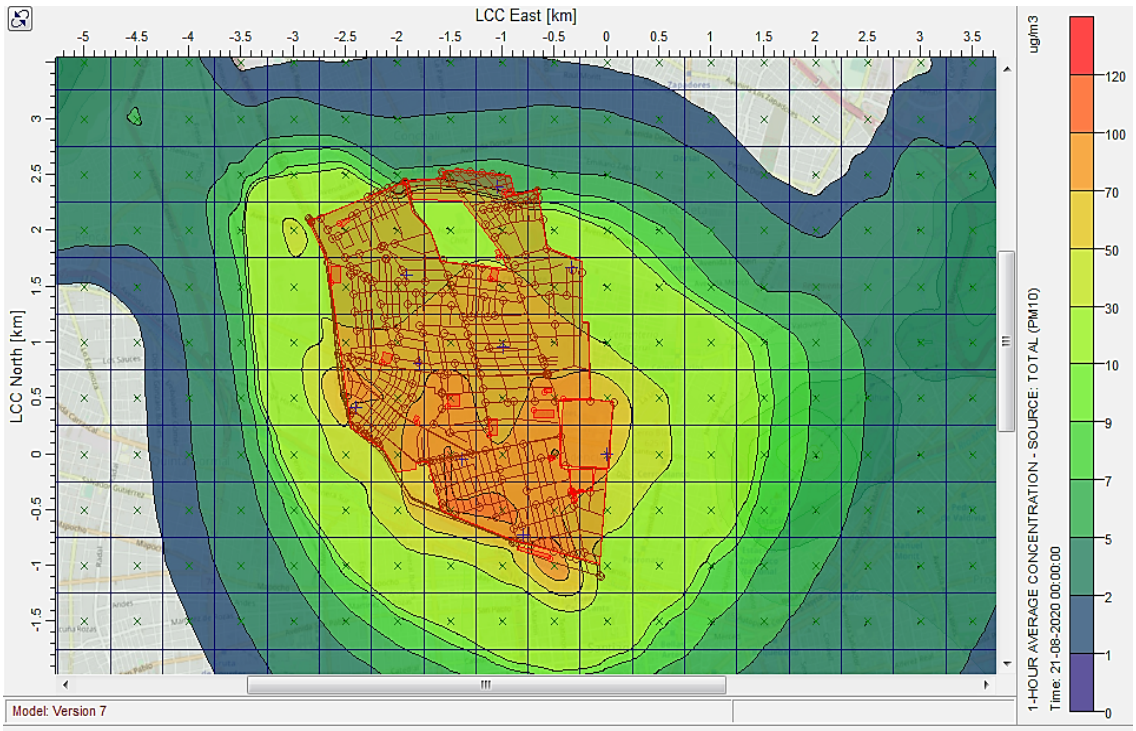


Figura 7.21: Dominio de la zona modelada. El perfil de la concentración de MP10 (también llamada "pluma") corresponde al día 21/08/2020 a las 0:00 horas. Fuente: elaboración propia.

Capturas en horas fijas del dominio modelado para MP2.5

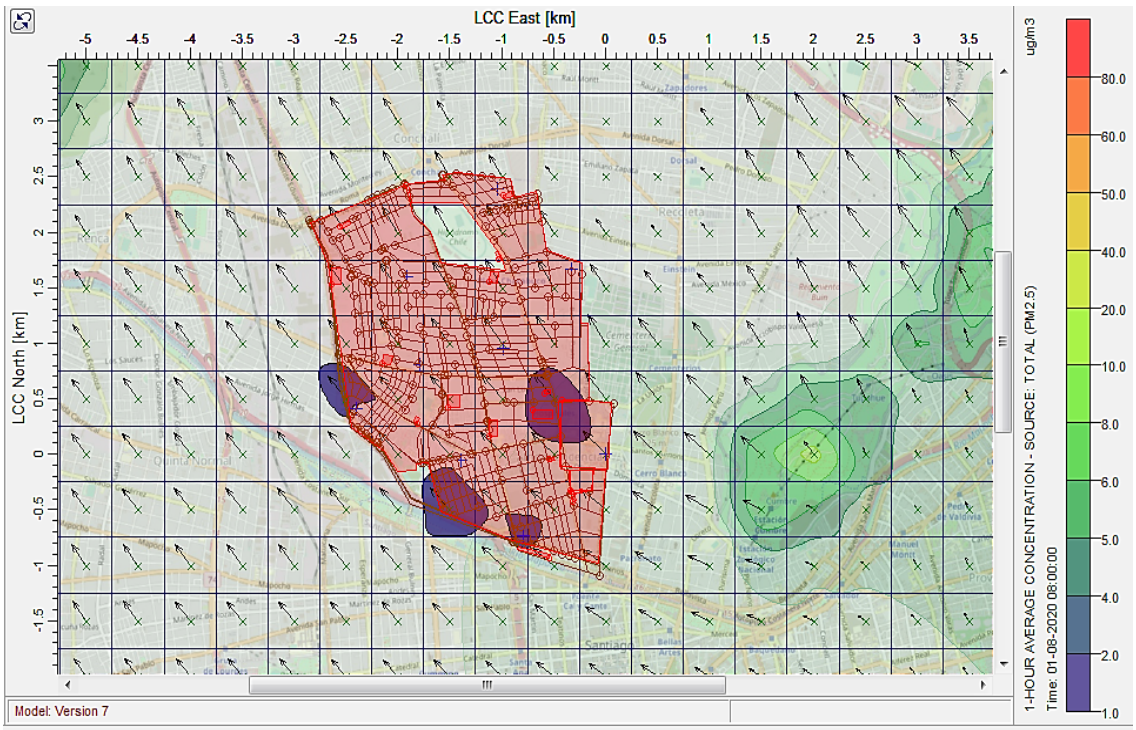


Figura 7.22: Dominio de la zona modelada. El perfil de la concentración de MP2.5 (también llamada "pluma") corresponde al día 01/08/2020 a las 8:00 am. Fuente: elaboración propia.

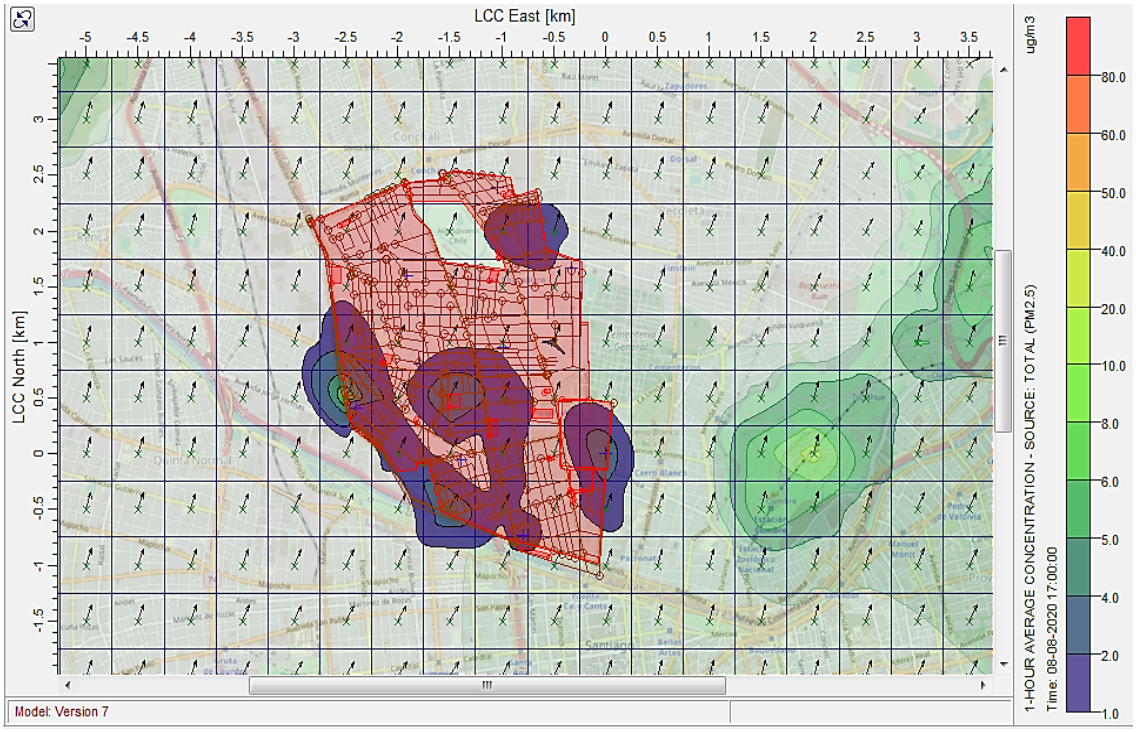


Figura 7.23: Dominio de la zona modelada. El perfil de la concentración de MP2.5 (también llamada "pluma") corresponde al día 08/08/2020 a las 17:00 pm. Fuente: elaboración propia.

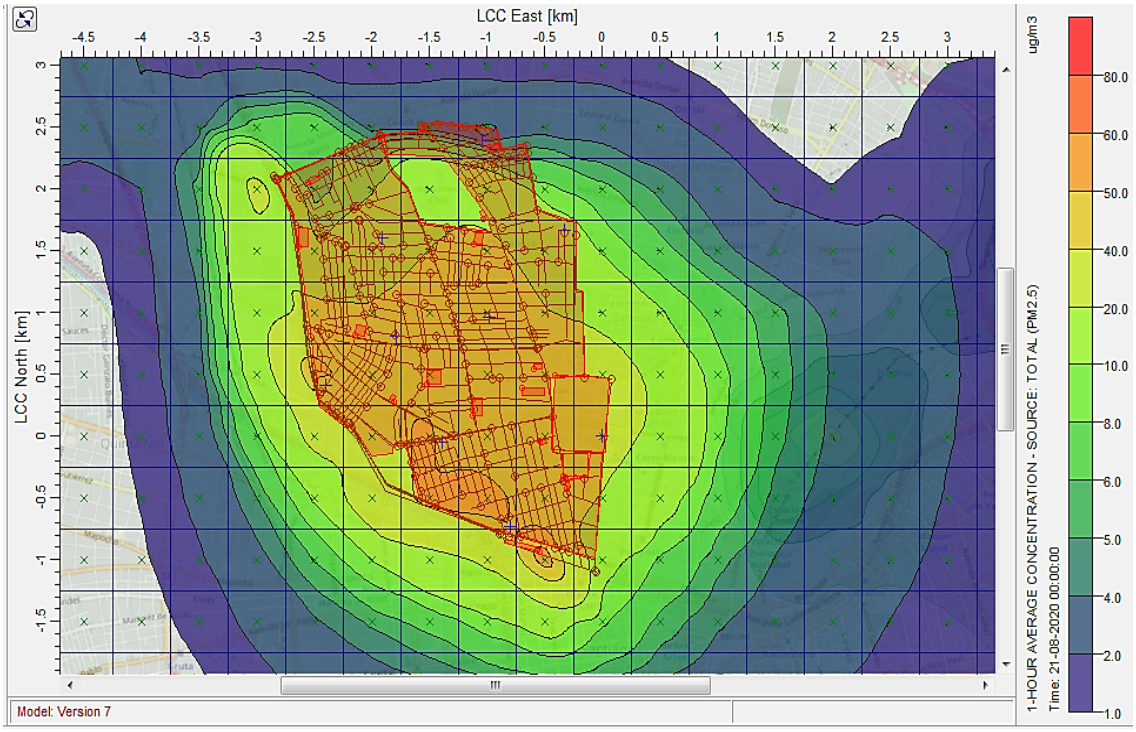


Figura 7.24: Dominio de la zona modelada. El perfil de la concentración de MP2.5 (también llamada "pluma") corresponde al día 21/08/2020 a las 0:00 horas. Fuente: elaboración propia.

7.2. Evaluación en FDR

Para la evaluación de las funciones dosis respuesta se consideró lo siguiente respecto a las variables ΔC, población expuesta, coeficiente de riesgo unitario y tasa de incidencia:

- Para el parámetro ΔC, según la guía AGIES, se considerará el promedio diario de las diferencias horarias entre el nivel predicho por el modelamiento modificado por el factor de corrección α y el nivel reducido de contaminantes en el aire tratado por la SFT. La consideración de niveles del contaminante corregidos tanto del modelado como los entregados por la SFT serán los del mismo dominio geográfico para ambos, es decir, la celda donde se implementará la SFT (punto discreto 1). Para la torre se utilizará una eficiencia promedio según el Anexo E: 71 % de capacidad de reducción para MP10 y 50 % de capacidad de reducción para MP2.5.

- Para el caso de la cantidad de población expuesta, utilizando el mismo enfoque realizado en [Ostro, 1994], se considerará la densidad poblacional reportada de la comuna y se relacionará proporcionalmente con el área abarcada por la celda de análisis, es decir, será cuociente entre la población total de la comuna de Independencia dividido por el número de mallas utilizada en la modelación puesto que el área de cobertura de la torre es prácticamente idéntica al área de una malla.

- Se utilizó el coeficiente de riesgo unitario medio recomendado por los autores de las FDR escogidas, específicamente de las investigaciones [Ostro, 1994], [Sánchez et al., 1998a] y la guía [Departamento de Economía Ambiental, 2013] en la sección "Estimación de beneficios"debido a que según bibliografía, es el parámetro más probable en términos estadísticos según las FDR, por lo que para calculos futuros en la evaluación económica, presenta una base sólida cuantitativamente hablando.

- Para el caso de los valores de tasa de incidencia o tasa de mortalidad, se utilizaron los valores entregados por el reporte estadístico de la Biblioteca Nacional del Congreso Nacional de Chile.

A continuación se presentan los resultados de las funciones dosis-respuesta para el MP10 y MP2.5 en cuanto a la cantidad estimada de casos evitados debido a la variación de concentración de MP disminuida por la SFT.

Tabla 7.6: Resultado estimado de casos evitados por variación de MP10 según las FDR seleccionadas.

Afección por MP10	Nivel o probabilidad	Casos evitados
Mortalidad Prematura (Largo plazo)	Alta	35.54
	Media	10.87
	Baja	9.406
Enfermedades Cardiovasculares	Alta	0.087
	Media	0.070
	Baja	0.053
Admisiones Hospitalarias	Alta	0.087
	Media	0.074
	Baja	0.065
Actividad restringida	Alta	2.611
	Media	1.844
	Baja	1.066
Bronquitis y tos (niños)	Alta	0.121
	Media	0.094
	Baja	0.077
Bronquitis crónica	Alta	0.010
	Media	0.007
	Baja	0.003
Ataques de asma	Alta	21.18
	Media	6.379
	Baja	3.605

Tabla 7.7: Resultado estimado de casos evitados por variación de MP2.5 según las FDR seleccionadas.

Afección por MP2.5	Nivel o probabilidad	Casos evitados
Mortalidad a largo plazo	Media	3.495
Bronquitis y tos 24 horas	Media	1.655
Admisiones Hospitalarias 24 horas	Media	0.564
Actividad restringida 24 horas	Media	1.730
Neumonía 24 horas	Media	1.580
Ataques de asma	Media	1.242

De los resultados preliminares anteriores es posible evidenciar que su magnitud a pesar de ser relativamente baja, es proporcional a la cantidad de población considerada en la zona expuesta a los campos vectoriales de MP. Adicionalmente a eso, se decidió escoger las afecciones suficientemente documentadas por las FDR de las distintas fuentes utilizadas, sin embargo, tal como se expuso anteriormente en el estudio de mercado, la problemática de contaminación atmosférica abarca muchas otras más enfermedades y posibles empeoramientos en la calidad de vida de las personas , tal como es el caso de enfermedades llamadas "oportunistas" que son potenciadas al entrar a un cuerpo humano con un sistema respiratorio debilitado por

la constante exposición crónica al MP, como por ejemplo el caso de la potenciación de la enfermedad Influenza [Washam, 2009] o incluso el retraso y afectación del desarrollo cognitivo infantil [ISGlobal, 2018]. Tampoco se consideraron en éste estudio cualquier otro tipo de enfermedades por exposición a largo plazo (salvo la mortalidad prematura) ni el aporte de MP desde otras comunas hacia el sector simulado tal como se explicó anteriormente en la etapa de simulación.

Capítulo 8

Estudio Económico

8.1. Método de cálculo para estimación monetaria de beneficio.

Obtenidos los valores de las FDR se procede a relacionarlos con su equivalencia en pérdidas económicas. Según [Ministerio del Medio Ambiente, 2012], el beneficio económico ganado debido a evitar padecer cualquier afección relacionada con la contaminación atmosférica es posible de estimar siempre y cuando se tenga la información del beneficio social unitario del contaminante, la variación de concentración y la población expuesta al contaminante. Para lo anterior, se hace uso de los resultados obtenidos de las FDR evaluadas en conjunto de la siguiente fórmula según la guía AGIES:

$$BS(\Delta C_k) = BSU^k \cdot \Delta C_k \cdot Pop_{jk} \tag{8.1}$$

Donde:
$BS(\Delta C_k)$: Beneficio Social Total en función de la variación del contaminante k.
BSU^k: Beneficio social unitario del contaminante k para la población expuesta j.
ΔC_k: Cambio de concentración del contaminante k.
Pop_{jk}: Población j expuesta al contaminante k en el periodo de estudio.

A su vez, el valor de beneficio social unitario BSU se estima de la siguiente manera:

$$BSU_j^k = \sum_{efectosi} \beta_{ij}^k \cdot IR_{ij} \cdot VS_{ij} \left[\frac{\$}{p \cdot ugm^{-3}}\right] \tag{8.2}$$

Donde:
BSU_j^k: Beneficio social unitario del contaminante k para la población expuesta j.
β_{ij}^k: Coeficiente de riesgo unitario del efecto i en la población j debido al contaminante k.
IR_{ij}: Tasa de incidencia del efecto i en la población j.
VS_{ij}: Valor social del efecto i debido al contaminante k en la población j.

De lo anterior, se puede deducir entonces:

$$BS(\Delta C_k) = VS_{ij} \cdot FDR(\Delta C_k) \tag{8.3}$$

El valor social del efecto i es determinado mediante las recomendaciones expuestas por [Ministerio del Medio Ambiente, 2012], específicamente utilizando el método COI mostrado en la guía antes mencionada, más la pérdida de bienestar que implica padecer alguna de las enfermedades o aflicciones anteriores, es decir, incluye tres niveles:

- Costo del tratamiento.
- Productividad perdida.
- Pérdida de bienestar.

Los valores de los parámetros considerados en el cálculo, se pueden corroborar en Anexo J.

8.2. Resultados económicos aplicados en las afecciones estudiadas con FDR

Tabla 8.1: Tabla de cantidad de casos posibles en la investigación considerando la población del sector y la variación de PM. El costo asociado a padecer esa aflicción, tanto para las provocadas por PM10 como por PM2.5 fueron extraídos de [GreenLab UC, 2012] y de [Sánchez et al., 1998a].

	Casos PM10			**Casos PM2.5**		
	Casos	**USD**	**CLP**	**Casos**	**USD**	**CLP**
Mortalidad	10,87	82,42	2.442.925	0,452	3,427	101.368
Admisiones	0,07	0,87	25.718	0,565	6,65	196.250
Actividad Rest	1,84	1,29	38.235	1,731	1,212	35.893
Bronquitis y tos	0,12	0,54	15.947	1,656	7,4	218.251
Ataques de asma	6,38	7,02	207.776	1,242	1,366	40.488
Bronquitis crónica	0,01	0,21	6.283			
Cardiovascular	0,07	3,43	101.368			
Neumonía				1,581	1,31	1.602.039
Total			2.838.252			2.194.289

8.3. Costo económico de la realización del proyecto

En lo que respecta al costo total estimado para la realización del proyecto, se debe considerar que es una tecnología patentada, por lo tanto se tiene información limitada respecto a algunos valores monetarios. Los costos a considerar en ésta investigación serán entonces:

- Costo del equipamiento/Instalación.
- Transporte desde el lugar de ubicación del equipo hasta el lugar de implementación.
- Mantención.
- Funcionamiento.
- Seguridad y protección.

La información de costo directo del equipo es entregada por la empresa, en lo que respecta a transporte del equipamiento, se trabajará como si se transportara cualquier otro equipo de mitigación de MP de nivel industrial (tales como filtros manga o precipitadores electrostáticos) sin embargo se recalca que al usar ésta suposición, se incurrirá en un error de estimación de su verdadero costo. De misma forma se abordará el aspecto de instalación debido a que ésa información la empresa no es capaz de entregarla de momento de manera directa y abierta (debido a que la tecnología es patentada). En lo que respecta a seguridad y protección, se optará por un cercado metálico para evitar contacto directo tanto por personas como con animales y un sistema de cámaras para la constante vigilancia, cabe recalcar que la ubicación de la torre está relativamente cerca de un recinto de seguridad policial (9° Comisaria de Carabineros de Independencia), sin embargo, no se descartan mayores medidas de seguridad a futuro. Finalmente para la mantención, se supondrá (tal como se ha visto en informes de países que han implementado éste equipo) una mantención semanal para la extracción del polvo de MP capturado.

Como observación no menor, se debe mencionar que la SFT no se vende directamente como un equipo individual, sino que la empresa ofrece un pack de servicio, incluyendo convenios, asesoría y seguimiento, por lo que estos valores extras posibles tampoco serán considerados inicialmente, sin embargo se hace hincapié en que deberán ser investigados a futuro. Por otra parte, en la actual estimación de coste total, tampoco son incluidos los costes por reemplazo de filtros internos, ya que si bien para los efectos de ésta investigación solo se está considerando un mes de operación, la torre debe cambiar luego de cierto tiempo los filtros interiores que capturaron el MP. Desgraciadamente ésta información, así como la frecuencia de recambio de los filtros es reservada por la empresa debido al tratarse de una tecnología patentada tal como se mencionó anteriormente. Por último, no se considerarán campañas publicitarias o de marketing sin embargo su aplicación no debería descartarse completamente para potenciar la visita y exposición de las personas al aire limpio que entrega la torre.

A continuación se presenta una tabla resumen de los costos y del costo total aproximado del proyecto, considerando sólo un período mensual (Agosto del año 2020):

Tabla 8.2: Costos del proyecto, los valores* corresponden a aproximaciones recomendadas en [Mussatti, 2002].

	Costo aproximado [US$]
Costo del equipamiento	**54.000**
Instalación*	**2.300**
Transporte*	**2.700**
Funcionamiento [129 pesos Chilenos/hora por cada 1170W]	**120**
Mantención (1 limpieza semanal)*	**620**
Seguridad y Protección	**14.000**
Pruebas iniciales*	**570**
Tratamiento de MP	
Contingencias*	**1.700**
Costo total aproximado en el período analizado	**76.010**

8.3.1. Análisis Económico

Considerando el beneficio aproximado que entregan las funciones dosis respuesta en la estimación de cuantos casos se podrían evitar y comparándolas con el costo estimado de llevar a cabo éste proyecto se decide abordar el análisis económico desde la estrategia de análisis costo beneficio (ACB) sugerida en [Ministerio del Medio Ambiente, 2012]:

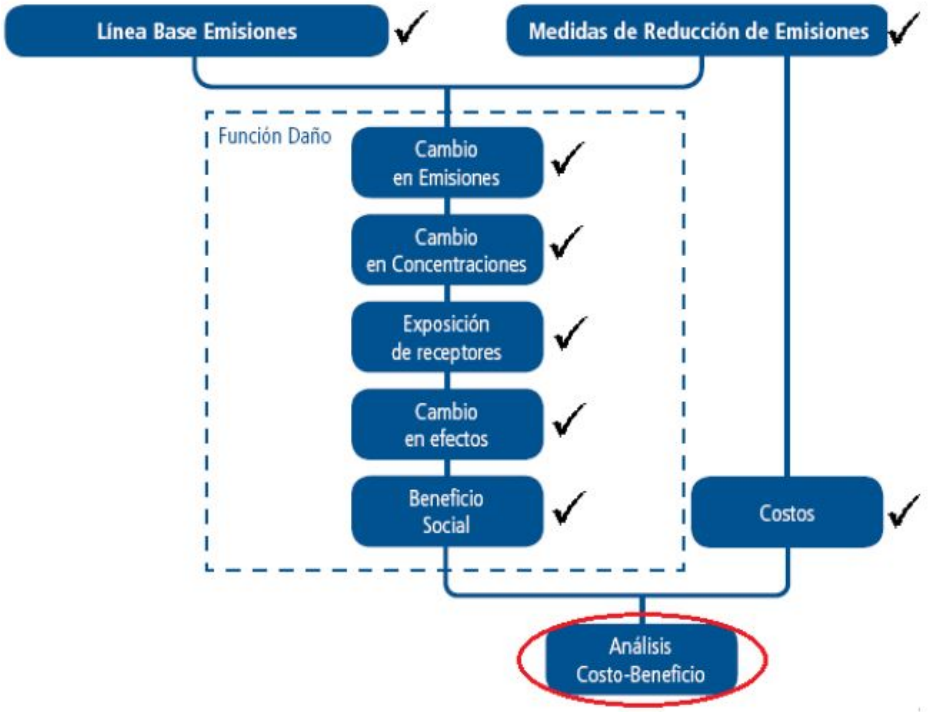


Figura 8.1: Esquema de pasos previos de la investigación que permiten realizar un análisis de Costo-Beneficio de la realización del proyecto.

Según la recomendación de [Ministerio del Medio Ambiente, 2012], para considerar un costo-beneficio producto de cualquier mejora respecto a la calidad del aire, es necesario considerar la agregación de beneficio social neto, la cual consiste en sumar todos los beneficios y costos percibidos en la salud (y en algunos casos la agricultura), es decir:

$$BSN_j = \sum_{\mathrm{i}} BSNE_{ij} \tag{8.4}$$

Donde:
BSN_j: Beneficio social neto agregado (considerando todos los beneficios analizados) dada una mejora de calidad atribuible a una medida de mitigación j.
$BSNE_{ij}$: Beneficio social neto en el tipo de efecto i dada una mejora en la calidad de aire atribuible a una medida de mitigación j.

De los resultados obtenidos en la Tabla 8.1 se obtuvo un estimativo de beneficio monetario de 2.838.252 [USD] para la mitigación enfocada al MP10 y de 2.194.289 [USD] para la

mitigación enfocada al MP2.5, sin embargo para lograr una mejor comprensión sobre el impacto de la realización del proyecto es recomendado utilizar distintas métricas e indicadores económicos. Sean los siguientes términos:

- Costo [USD]: Costo total de implementar dicha medida.
- Beneficio [USD]: Beneficio social producto de las reducciones gracias a dicha medida.
- Beneficio anual proyectado [USD]: Beneficio social anualizado.
- Reducción [Ton] o [µg]: Reducción de emisiones o concentración de contaminante con dicha medida.
- t: Período en que se produce el flujo de beneficios.

Se pueden utilizar entonces las siguientes métricas: Costo-Efectividad: Costo de lograr una reducción unitaria de concentraciones de un contaminante en [$/µg/m^3] y razón beneficio-costo: indica la relación entre beneficios en la salud de la población y costos de funcionamiento e instalación del equipo. Si éste arroja un valor superior a 1, se trata de un proyecto de rentabilidad social positiva.

Puesto que se sabe según la investigación realizada que los beneficios en la salud de la población requieren de tiempo para poder manifestarse sobre todo en casos de mejoras ambientales con consecuencias en la salud humana, [Ministerio del Medio Ambiente, 2012] recomienda utilizar el beneficio social neto, el cual considera todos los flujos futuros monetarios generados por la realización del proyecto. Los flujos negativos serán entonces producto de los costos iniciales y los flujos positivos serán a causa de los beneficios en la salud:

$$BSN = \frac{BeneficioNetoAnual}{(1+r)^t}[USD] \tag{8.5}$$

Donde:
BSN: Beneficio Social Neto (análogo al VAN).
r: Tasa de descuento considerada para el proyecto.
t: Período considerado.

Considerando que el período de investigación debido a la capacidad del modelamiento sólo abarca 1 mes, para efectos estimativos hipotéticos se proyectará la reducción de contaminación por MP utilizando la SFT a lo largo de todo el año 2019 considerando el uso de los datos entregados por la red de monitoreo MACAM, sin embargo se señala encarecidamente que esta proyección de datos es sólo para poder presentar un estimado en las métricas económicas, recomendando que para futuros estudios con ayuda de programas de modelación con mayor capacidad y precisión se considere la totalidad del año para cualquier medida de reducción de contaminantes atmosféricos.

Dicho lo anterior, se presenta a continuación los valores de las métricas económicas considerando:

- Probabilidad media (más probable) de impacto en la población entregadas por las FDR para el MP10.
- La única posibilidad estudiada para el MP2.5 (media).

- Los datos de MP de la totalidad del año 2019 no modelados, obtenidos de la red MACAM con su respectivo percentil y reducción de concentración utilizando la SFT (ver gráfica de valores anuales de MP de independenca en el año 2019 en anexo K).
- Para la métrica de costo-efectividad, el cálculo de la captura total de MP10 y MP2.5 tanto mensual como proyectado anualmente se obtiene mediante un balance de materia simple, se puede comprobar en anexos L.
- La cantidad neta de MP fino y grueso calculado, tanto en el modelado mensual como en el proyectado anual del año 2019.

Métricas mensuales:

- Costo-efectividad:

$$\frac{76010}{4447(MP10) + 4074(MP2{,}5)} = 8,92 \left[\frac{USDcosto}{\frac{ug}{m^3}}\right] \tag{8.6}$$

- Razón costo-beneficio:

$$\frac{3724(MP10) + 2879(MP2{,}5)}{76010} = 0,086 \left[\frac{USDbeneficio}{USDcosto}\right] \tag{8.7}$$

- Contaminante total capturado en el período mensual:

MP2.5

$$8,507 \cdot 10^{10} \left[\frac{ug}{mes}\right] \rightarrow 0,085 \left[\frac{ton}{mes}\right] \tag{8.8}$$

MP10

$$9,286 \cdot 10^{10} \left[\frac{ug}{mes}\right] \rightarrow 0,092 \left[\frac{ton}{mes}\right] \tag{8.9}$$

Métricas anuales:

- Costo-efectividad:

$$\frac{106524}{168385(MP10) + 290615(MP2{,}5)} = 0,23 \left[\frac{USDcosto}{\frac{ug}{m^3}}\right] \tag{8.10}$$

- Razón costo-beneficio:

$$\frac{140736(MP10) + 55738(MP2{,}5)}{106524} = 1,884 \left[\frac{USDbeneficio}{USDcosto}\right] \tag{8.11}$$

- Contaminante total capturado en el período anual:

MP2.5

$$4,42 \cdot 10^{15} \left[\frac{ug}{año}\right] \rightarrow 44,25 \left[\frac{ton}{año}\right] \tag{8.12}$$

MP10

$$7,63 \cdot 10^{15} \left[\frac{ug}{año}\right] \rightarrow 76,37 \left[\frac{ton}{año}\right] \tag{8.13}$$

Gráfica de análisis de sensibilidad (considerando una tasa social de descuento central de un 3 % y evaluando un rango comprendido entre 2 % y 12 % según lo recomendando por [Ministerio del Medio Ambiente, 2012].

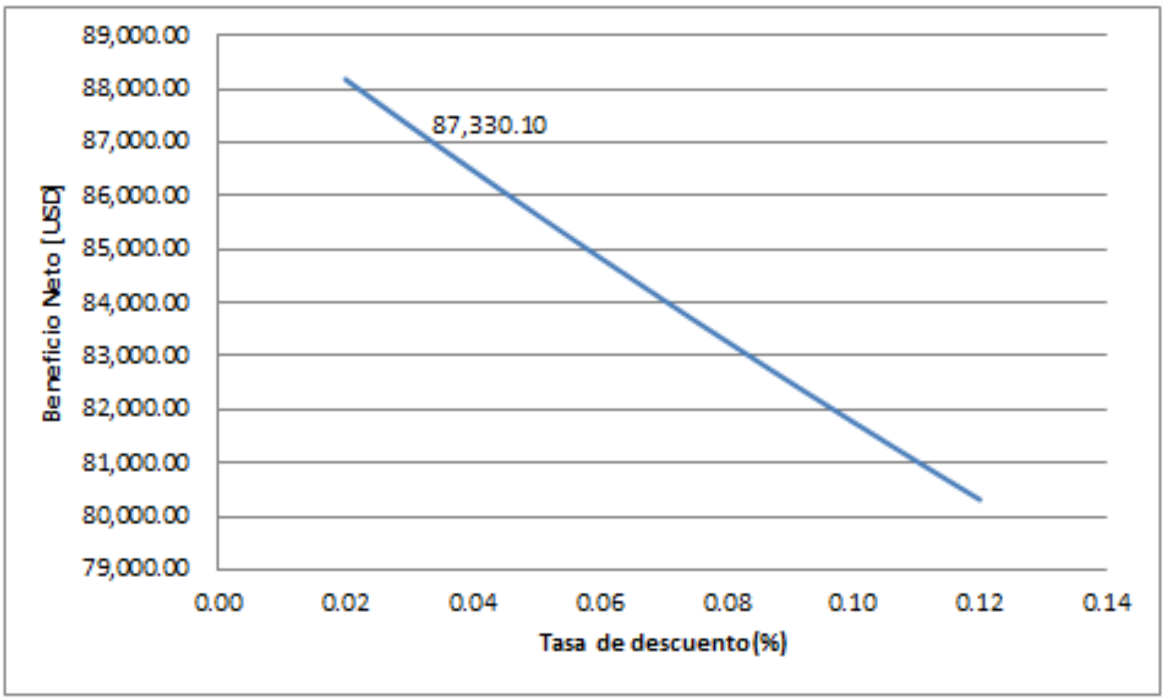


Figura 8.2: Gráfica de sensibilidad para Beneficio Social Neto con rango de tasa de interés recomendado por el MMA. Fuente: [Ministerio del Medio Ambiente, 2012].

Capítulo 9

Conclusiones y recomendaciones

Como se puede ver en las primeras secciones del presente estudio las cuales corresponden al estado del arte y marco teórico referencial, Chile al igual que muchos otros países alrededor del mundo ha tomado conciencia y acciones sobre cómo prevenir o al menos aliviar el gran impacto que ocasiona la contaminación atmosférica en la población urbana diariamente. La implementación de programas regionales y nacionales tales como el PPDA en nuestro país son una gran herramienta que efectivamente ha logrado a través del tiempo una mejoría en cuanto a la calidad del aire a la cual están expuestos los ciudadanos, y lo que es más importante aún, lo ha ido logrando desde distintos enfoques, sean creando una nueva cultura o sentido de conciencia del ciudadano, utilizando restricciones y mediaciones normativas en cuanto a las tecnologías contaminantes y por último comenzando a abrir a nuevas tecnologías ya directamente más preventivas que reactivas.

Dicho lo anterior, es evidente que tanto las entidades públicas como privadas tienen un gran desafío por delante en el caso particular de regiones como la de la Región Metropolitana, no solamente por las conocidas características climáticas y geográficas que agudizan los efectos de acumulación de material atmosférico contaminante en la cuenca del gran Santiago, sino porque además el crecimiento demográfico explosivo que ha estado experimentando la ciudad y que por consecuencia incrementa las fuentes típicas de contaminación, demanda por consecuencia tecnologías cada vez más eficientes y eficaces para poder proteger de este fenómeno a los ciudadanos de la región.

El estudio, y por consiguiente la implementación de estas u otras tecnologías y herramientas debe seguir desarrollándose, y deberán profundizarse más para lograr una mejor estimación del impacto en la disminución de los niveles actuales de MP. De lo anterior, tecnologías como la SFT si bien no solucionan el problema directamente y de raíz, sirven como ayuda para la actual campaña nacional de disminución de contaminación atmosférica del Ministerio del Medio Ambiente.

Junto con lo anterior, para encontrar lugares geográficos críticos de contaminación y exposición, una selección de criterios más precisa y que contemple otros factores críticos en la población lograrían eventualmente escoger lugares más idóneos para implementar éstas tecnologías, que de momento aún tienen una magnitud de alcance reducida y fija. Cabe destacar

que, sea ésta u otra tecnología, siempre será recomendable además buscar mejoras continuas de sistemas de modelado de contaminación atmosférica que logren predecir a través del tiempo y de mejor manera las condiciones reales del entorno atmosférico en el cual se desean poner a prueba. Añadido a lo anterior no se descarta la aplicación de modelos probabilísticos que ajusten finamente la exposición efectiva de los ciudadanos al aire limpio de impurezas a la que se expondrán. Para efectos de éste estudio de prefactibilidad, la estimación de la cantidad de eventos que pueden evitarse al implementar esta estragía indica un número confiable y realista en cuanto a lo que se podría esperar de una tecnología de alcance limitado como la SFT y abre camino a futuros enfoques distintos con la hipotética aplicación de otras tecnologías disponibles en otros países, y que como se logró identificar en este trabajo, están logrando resultados satisfactorios en las comunidades donde están implementadas.

En el caso de los programas de modelación atmosférica WRF y Calpuff utilizados en esta investigación, se destacan las falencias u/o omisiones que los programas por falta de información no fueron capaces de suplir tales como la consideración de MP entrante a la zona desde otras comunas. Sin embargo, para el caso de predicción de modelos atmosféricos de dispersión de contaminantes, los resultados obtenidos y los perfiles de concentración de MP fino y grueso en el área de instalación de la SFT son bastante aceptables y suficientes para entregar una primera información generalizada del comportamiento de la zona para luego poder establecer de mejor manera el hipotético impacto de la SFT. Puesto que la condición idónea de esta investigación hubiera sido la implementación y análisis de la puesta en marcha real del equipo u al menos de un equipo piloto que lo emule, las eficiencias supuestas de la SFT para este proyecto de 71 % de captura para MP10 y 50 % de captura para MP2.5 en base a su ficha técnica podrían haber sido claramente variables, sin embargo, el perfil cíclico en función de las horas del día y noche, en conjunto con los patrones de vientos en el dominio modelado, emulan fielmente al menos en comportamiento las concentraciones de MP, difiriendo en magnitud, la cual tal como se mencionó anteriormente, es dificil alcanzar valores similares a los indicadores reales de MP, pero es posible mejorar disminuyendo variables con alta incertidumbre, como el aporte de otras comunas de MP, inventario actualizado de emisiones atmosféricas e incluso el estudio a fondo de cuanto las condiciones geográficas y metereológicas de Santiago influyen y dificultan una modelación adecuada.

Respecto al impacto cuantitativo, obtenidos los perfiles de concentración y la evaluación en las FDR se observa que éstas entregan valores proporcionalmente sensatos entre la población expuesta en la zona de estudio, y la cantidad de personas reportadas que son afectadas anualmente en Santiago por las distintas afecciones asociadas al MP, tal como por ejemplo la mortalidad. No obstante el perfeccionamiento de las FDR puede, y debería con el tiempo mejorar, vale decir, lograr coeficientes o relaciones que se adecuen de mejor manera a la exposición efectiva de una población, así como también la incorporación de variables que consideren de manera más precisa una exposición efectiva y directa al MP o que considere la prolongación de esta exposición. Se mencionó anteriormente, y se vuelve a hacer hincapié al hecho de que el uso de ésta tecnología en un sector público o cualquier otra tecnología depende muy enormemente de que los ciudadanos se expongan al beneficio que estas tecnologías puedan brindarles a ellos, y cuánto debe ser la "cuota de aire limpio" que deberán respirar para lograr algún beneficio o alivio directo y tangible.

Respecto al último objetivo secundario propuesto en este estudio, en términos económicos,

es esperable que proyectos con un enfoque de "beneficio social" no entreguen un beneficio expedito y tangible a corto plazo, y más si aún no existe abiertamente un mercado del "aire limpio", sin embargo la aproximación recomendada por [Ministerio del Medio Ambiente, 2012] sobre darle una valoración análoga al valor actual neto es útil para poder establecer mejores comparaciones. Si bien, la inversión inicial de 59.531.023 [CLP] es significativamente alta y el proyecto en sí presenta una incertidumbre evidenciada anteriormente, las proyecciones de beneficios se hicieron netamente para el período de un solo año, con un valor total aproximado de 70.237.376 [CLP]. Debido a que la capacidad de predictibilidad del modelo disminuye a medida que se prolonga el tiempo de modelación, el beneficio neto anual considerado fue supuesto para el resto de los meses que no entraron en la modelación. Aun así en el caso pesimista de considerar inclusive la mitad de éste beneficio neto anual, el equipo es perfectamente capaz de mantener su funcionamiento por un período prolongado de más de un año por lo que los beneficios de evitar eventos de morbilidad producto del MP en la población local pueden seguir aumentando. Tanto este factor, como una cuantificación efectiva y exacta de la interacción entre los pobladores de la zona y el equipo serán finalmente pilares clave para estimar el beneficio real que el proyecto, en conjunto con las entidades públicas correspondientes podrían traer a la población de la zona.

A modo de recomendaciones, independientemente de si ésta u otra tecnología decide implementarse a futuro, siempre será útil que éstas dos variables de capacidad de captura de MP y exposición efectiva del individuo mencionadas anteriormente estén controladas de una manera más precisa para así poder entregar un mejor valor de cuantificación de beneficio monetario ahorrado. Para efectos de los actuales programas de mitigación de MP en la RM, el valor estimado de captura mensual y anual de MP no deja de ser un dato útil, ya que según lo expuesto en el programa de compensación de emisiones del MMA, muchas veces importa la taza directa de captura de contaminante del mecanismo de compensación, independientemente de la ubicación de la fuente contaminante que deberá compensar dentro de la RM. Otro punto importante que este estudio deja abierto es el tratamiento posterior del MP capturado, ya que otros países colectan el contaminante y como iniciativa lo traducen en souvenirs, sin embargo, el alto porcentaje de carbono como composición química del MP deja lugar a posibles estudios donde sea útil someter todo el MP capturado a un tratamiento posterior para por ejemplo, estudiar su capacidad de abono en plantas o bacterias. Una última recomendación es directamente tomar éste estudio y estudiar su transformación por medio de entidades incubadoras de proyectos, para que así pueda tal como se planeó inicialmente, lograr realizarse realmente sea en la ciudad de Santiago o en cualquiera de las otras zonas del país que es sabido que presentan los mismos problemas en cuanto a contaminación atmosférica.

Finalmente, éste estudio tiene la intención de mostrar una manera general la utilidad que pueden entregar tecnologías emergentes que ayudan a mitigar la actual crisis de contaminación por MP que numerosas ciudades del mundo, incluyendo la Región Metropolitana de Santiago viven día a día. Poder articular estudios de este tipo que ayuden a entidades gubernamentales a tomar mejores decisiones medioambientales traerá finalmente como consecuencia beneficios futuros para la comunidad y lograrían una mayor consciencia de los impactos que éste tipo de problemas ocasiona a la sociedad.

Bibliografía

[PAH, 2018] (2018). *Indicadores de salud. Aspectos conceptuales y operativos*. Organización Panamericana de la Salud.

[Arciniégas S., 2012] Arciniégas S., C. A. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable pm10. *Revista Luna Azul*, (34):195–213. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=321727348012.

[Balmaceda E., 2016] Balmaceda E., M. (2016). Normativa de emisión de material particulado fino (Ley N. 19.300) : importancia para las políticas públicas y la regulación ambiental en Chile. http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/139299.

[Baumann-Stanzer et al., 2019] Baumann-Stanzer, K., Greilinger, M., Kasper-Giebl, A., Flandorfer, C., Hieden, A., Lotteraner, C., Ortner, M., Vergeiner, J., Schauer, G., and Piringer, M. (2019). Evaluation of WRF-chem model forecasts of a prolonged saharan dust episode over the eastern alps. *Aerosol and Air Quality Research*, 19(6):1226–1240.

[Bishop et al., 2018] Bishop, K. C., Ketcham, J. D., and Kuminoff, N. V. (2018). Hazed and confused: The effect of air pollution on dementia. Working Paper 24970, National Bureau of Economic Research.

[Blackburn, 2018] Blackburn, J. (2018). Kraków's smog free project. *New Eastern Europe.* https://neweasterneurope.eu/2018/02/26/krakows-smog-free-project/.

[Brauer, M. et al., 2016] Brauer, M. et al. (2016). PM2.5 air pollution, population exposed to levels exceeding WHO guideline value (% of total), for the Global Burden of Disease Study 2016. https://ourworldindata.org/grapher/share-above-who-pollution-guidelines.

[Celis Hidalgo et al., 2007] Celis Hidalgo, J., Morales, J., Zaror, C., and Carvacho, O. (2007). Contaminación del Aire Atmosférico por Material Particulado en una Ciudad Intermedia: El Caso de Chillán (Chile). *Información tecnológica*, 18.

[Centro de Ciencias Ambientales, sf] Centro de Ciencias Ambientales (s.f.). Investigación. https://cca.ciencias.uchile.cl/research/.

[CNN, 2019] CNN (2019). 9 de las 10 ciudades más contaminadas de Sudamérica están en Chile. https://www.cnnchile.com/pais/ciudades-mas-contaminadas-chile-sudamerica_20190305.

[Comisión Nacional de Energía, 2009] Comisión Nacional de Energía (2009). Modelación de un recurso solar y eólico en el norte de Chile.

[de la Cuadra, 2010] de la Cuadra, F. M. (2010). *Conflicto ambiental y acción colectiva en Chile: El caso de la contaminación atmosférica de Santiago.* CLACSO, Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales.

[De Oriente a Occidente, 2013] De Oriente a Occidente (2013). Paredes que se alimentan de smog. https://deorienteaoccidente.wordpress.com/2013/10/27/paredes-que-se-alimentan-de-smog/.

[Decreto 100, 2005] Decreto 100 (2005). Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Fija el texto refundido, coordinado y sistematizado de la Constitución Política de la República de Chile. 17 de Septiembre de 2005.

[Decreto 12, 2010] Decreto 12 (2010). Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Declara zona saturada por material particulado respirable MP10, a las comunas de Talca y Maule. 4 de Febrero de 2010.

[Decreto 1583, 1993] Decreto 1583 (1993). Ministerio de Salud. Establece norma de emisión de material particulado a fuentes estacionarias puntuales que indica. 26 de Abril de 1993.

[Decreto 16, 1998] Decreto 16 (1998). Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Establece plan de prevención y descontaminación atmosférica para la Región Metropolitana. 22 de Enero de 1998.

[Decreto 31, 2016] Decreto 31 (2016). Ministerio del Medio Ambiente. Establece plan de prevención y descontaminación atmosférica para la región metropolitana de Santiago. 11 de Octubre de 2016.

[Decreto 59, 1998] Decreto 59 (1998). Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Establece norma de calidad primaria para material particulado respirable MP10, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia. 16 de Marzo de 1998.

[Decreto 811, 1993] Decreto 811 (1993). Ministerio de Salud. Prohibe funcionamiento de chimeneas para calefacción en viviendas y establecimientos de la Región Metropolitana. 15 de Abril de 1993.

[Decreto 812, 1995] Decreto 812 (1995). inisterio de Salud. Complementa procedimiento de compensación de emisiones para fuentes estacionarias puntuales que indica. 27 de Abril de 1995.

[Departamento de Economía Ambiental, 2013] Departamento de Economía Ambiental (2013). Guía Metodológica para la Elaboración de un Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) para Instrumentos de Gestión de Calidad del Aire. Ministerio del Medio Ambiente. http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-54428_guia_metodologica.pdf.

[Departamento de Normas y Políticas, 2016] Departamento de Normas y Políticas (2016).

Recopilación y comparación de los valores norma de calidad primaria para material particulado respirable MP10 a nivel internacional. Ministerio del Medio Ambiente https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2016/proyectos/minuta_normas_internacionales_mp10.pdf.

[Departamento de Relaciones Internacionales e Interuniversitarias, sf] Departamento de Relaciones Internacionales e Interuniversitarias (s.f.). María Ignacia Lucares: una arquitecta abierta al mundo. Universidad de Santiago de Chile. https://www.drii.usach.cl/es/noticia/mar%C3%ADa-ignacia-lucares-una-arquitecta-abierta-al-mundo.

[DFM Consultores Ambientales, 2019] DFM Consultores Ambientales (2019). Guía de alternativas de compensación de emisiones para fuentes de combustión.

[El Independiente, 2018] El Independiente (2018). El ozono troposférico provoca 500 muertes al año en España. https://www.elindependiente.com/vida-sana/salud/2018/08/21/el-ozono-troposferico-es-el-causante-de-500-muertes-anuales-en-espana/.

[ENS, 2017] ENS (2017). Case study: Smog Free Tower (measurements in an urban environment). https://cdn.archilovers.com/projects/06505a46-61e1-4d28-a371-aa1ce924d3a4.pdf.

[ENS, sf] ENS (s.f.). Projects. https://www.ens-cleanair.com/en/projects-ens/.

[Enviromental Protection Agentcy, sf] Enviromental Protection Agentcy (s.f.). Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente: Efectos sobre la salud https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente.

[Explora, sf] Explora (s.f.). Infografías. Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. https://www.explora.cl/blog/biblioteca_digital/emisiones-primarias/.

[Greencity Solutions, 2021] Greencity Solutions (2021). The Citytree. https://greencitysolutions.de/en/products/citytree/.

[GreenLab UC, 2012] GreenLab UC (2012). Análisis Técnico-Económico de la Aplicación de Nuevas Normas de Emisión para Fuentes Móviles a Nivel Nacional, Informe final: 20 de Marzo de 20212.

[Greenpeace, 2019] Greenpeace (2019). Informe mundial: Ciudades chilenas encabezan ránking de las urbes con peor calidad de aire del continente el 2018 https://www.greenpeace.org/chile/noticia/issues/climayenergia/informe-mundial-ciudades-chilenas-encabezan-ranking-de-las-urbes-con-peor-calidad-de-aire-del-continente-el-2018/.

[Hydrosim, sf] Hydrosim (s.f.). ¿Qué es? https://www.hidrosym.cl/filtrovivo/habitacional/.

[India - ICT, sf] India - ICT (s.f.). Smog Free Tower (Beijing - China). http://icities4greengrowth.in/casestudy/smog-free-tower-beijing-china.

[INE, 2017] INE (2017). Densidad de Población y Vivienda, Censo 2017. https://storymaps.arcgis.com/stories/1b9d35a61879474c93f597471fdea507.

[Instituto Nacional del Cáncer, sf] Instituto Nacional del Cáncer (s.f.). Morbilidad. https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionarios/diccionario-cancer/def/morbilidad.

[Instituto para la Salud Geoambiental, 2013] Instituto para la Salud Geoambiental (2013). El dióxido de azufre SO2.

[ISGlobal, 2018] ISGlobal (2018). 5 claves para ciudades más sustentables. https://www.isglobal.org/es/ciudadesquequeremos?gclid=cjwkcajw2zagbhboeiwa8pfp_u4ddgp0krmyadaofz3jj7vodvdsw_ws5lhayo50suco_judqkgsrocyqcqavd_bwe#efectossalud.

[Jorquera-Fontena and Orrego, 2010] Jorquera-Fontena, E. and Orrego, R. (2010). Impact of global warming on the phenology of a variety of grapevine grown in southern chile. *Agrociencia*, 44:427–435.

[Ley 19300, 1994] Ley 19300 (1994). Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Aprueba ley sobre bases generales del medio ambiente. 1 de Marzo de 1994.

[Ley 20780, 2014] Ley 20780 (2014). Ministerio de Salud. Reforma tributaria que modifica el sistema de tributación de la renta e introduce diversos ajustes en el sistema tributario. 26 de Septiembre de 2014.

[Martilli and Schmitz, 2007] Martilli, A. and Schmitz, R. (2007). Implementation of an urban canopy parameterization in wrf-chem. preliminary results.

[Ministerio del Medio Ambiente, 2012] Ministerio del Medio Ambiente (2012). Guía para el uso de modelos de calidad del aire en el SEIA. https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration_files/guias/guia_uso_modelo_calidad_del_aire_seia.pdf.

[Ministerio del Medio Ambiente, 2015a] Ministerio del Medio Ambiente (2015a). Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire. Glosario de términos. https://sinca.mma.gob.cl/index.php/pagina/index/id/glosario.

[Ministerio del Medio Ambiente, 2015b] Ministerio del Medio Ambiente (2015b). Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire. Región Metropolitana de Santiago. https://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/index/id/m.

[Ministerio del Medio Ambiente, 2016] Ministerio del Medio Ambiente (2016). Guía de calidad del aire y educación ambiental. https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/08/Guia-para-Docentes-Sobre-Calidad-del-Aire-003.pdf.

[Ministerio del Medio Ambiente, 2018] Ministerio del Medio Ambiente (2018). Primeros Resultados Encuesta Nacional de Medioambiente 2018. https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/02/primeros-resultados-encuesta-nacional-de-medioambiente-2018.pdf.

[Ministerio del Medio Ambiente, 2019a] Ministerio del Medio Ambiente (2019a). Quinto Reporte del Estado del Medio Ambiente. pg. 110. https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/12/rema-2019-comprimido.pdf.

[Ministerio del Medio Ambiente, 2019b] Ministerio del Medio Ambiente (2019b). Quinto Reporte del Estado del Medio Ambiente. pg. 112. https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/12/rema-2019-comprimido.pdf.

[Ministerio del Medio Ambiente, 2019c] Ministerio del Medio Ambiente (2019c). Quinto Reporte del Estado del Medio Ambiente. pg. 116. https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/12/rema-2019-comprimido.pdf.

[Ministerio del Medio Ambiente, sf] Ministerio del Medio Ambiente (s.f.). Preguntas frecuentes. http://airechile.mma.gob.cl/faq.

[Ministerio del Obras Públicas, 2017] Ministerio del Obras Públicas (2017). Informe trimestral coordinación de concesiones de obras públicas: Enero-Marzo 2017. http://www.concesiones.cl/documents/2017/primer_informe_trimestral_y_anexo.pdf.

[Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico., sfa] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.a). Ozono. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/ozono.aspx.

[Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico., sfb] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.b). Óxidos de Nitrógeno. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/oxidos-nitrogeno.aspx.

[Murcia + Salud, sf] Murcia + Salud (s.f.). Monóxido de carbono. https://www.murciasalud.es/pagina.php?id=180398idsec=1573.

[Mussatti, 2002] Mussatti, D. C. (2002). Precipitadores electrostáticos. *Manual de costos de control de contaminación del aire de la EPA. (pp.3.38-3.58).* U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards.

[Organización Mundial de la Salud, 2019] Organización Mundial de la Salud (2019). Intoxicación por plomo y salud. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health.

[Organización Mundial de la Salud, 2021] Organización Mundial de la Salud (2021). Contaminación del aire de interiores y salud.https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health.

[Organización Panamericana de la Salud, 2005] Organización Panamericana de la Salud (2005). OMS Guías de Calidad del Aire. Actualización Mundial 2005. Informe de la Reunión del Grupo de Trabajo, Bonn, Alemania, 18-20 Octubre 2005. https://iris.paho.org/handle/10665.2/52697.

[Organización Panamericana de la Salud, s f] Organización Panamericana de la Salud (s. f.). Calidad del Aire. https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire.

[O'Ryan and Larraguibel, 2000] O'Ryan, R. and Larraguibel, L. (2000). *Contaminación del aire en Santiago: Estado actual y soluciones.* Documentos de Trabajo 75, Centro de Economía Aplicada, Universidad de Chile.

[Ostr et al., 1995] Ostr, B., Sánchez, J., Aranda, C., and Eskeland, G. (1995). Air pollution and mortality : results from santiago, chile. *Expos. Anal. Environ. Epidemiol.*, 6.

[Ostro, 1994] Ostro, B. (1994). Estimating the health effects of air pollutants : a method with an application to Jakarta. Policy Research Working Paper Series 1301, The World Bank.

[Ostro, 1996] Ostro, B. (1996). A Methodology for estimating air pollution health effects. HEADLAMP and World Health Organization. Office of Global and Integrated Environmental Health.

[Ostro, 1998] Ostro, B. (1998). Cómo estimar los efectos de la contaminación atmosférica en la salud. *Estudios Públicos*, 69.

[Oyarzún G., 2010] Oyarzún G., M. (2010). Contaminación aérea y sus efectos en la salud. *Revista chilena de enfermedades respiratorias*, 26:16 – 25.

[Prieto C. et al., 2007] Prieto C., M. J., Mancilla F., P., Astudillo O., P., Reyes P., , and Román A., O. (2007). Exceso de morbilidad respiratoria en niños y adultos mayores en una comuna de Santiago con alta contaminación atmosférica por partículas. *Revista Médica de Chile*, 135:221 – 228.

[Raya, 2018] Raya, A. (2018). China construye el mayor purificador de aire del mundo, de 100 metros de altura. *El Español.* https://www.elespanol.com/omicrono/tecnologia/20180116/china-construye-mayor-purificador-mundo-metros-altura/277723614_0.html.

[Redacción El Tiempo, 2016] Redacción El Tiempo (2016). Airbol purifica el aire de Medellín. https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16593927.

[Revista El Tiempo, 2019] Revista El Tiempo (2019). Países con aire más contaminado del mundo. https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/los-paises-con-el-aire-mas-contaminado-del-mundo-362094.

[Rutllant and Garreaud, 1995] Rutllant, J. and Garreaud, R. (1995). Meteorological air pollution potential for santiago, chile: Towards an objective episode forecasting. *Environmental Monitoring and Assessment*, 34(3):223–244.

[Saide P., 2008] Saide P., P. E. (2008). *Emisiones de Monóxido de Carbono en Santiago de Chile: Distribución Espacial y Optimización por Modelación Inversa.* Disponible en http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/101913.

[Salini C., 2009] Salini C., G. (2009). *Desarrollo de un modelo para pronosticar concentraciones de PM2.5 en Santiago.* PhD thesis, Universidad de Santiago de Chile.

[Schmitz et al., 2008] Schmitz, R., Falvey, M., and Jacques Coper, M. (2008). Implementación de un modelo fotoquímico de alta resolución para la macrozona central del país.

[Secretaría Regional Ministerial, 2018] Secretaría Regional Ministerial (2018). Balance PPDA 20 años. Ministerio del Medio Ambiente. http://airesantiago.gob.cl/balance-1997-2017/.

[SIIT, 2017a] SIIT (2017a). Reporte comunal 2017: Independencia; Sistema Integrado de Información Territorial; Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. https://reportescomunales.bcn.cl/2017/index.php/independencia.

[SIIT, 2017b] SIIT (2017b). Reporte comunal 2017: La Florida; Sistema Integrado de Información Territorial; Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2017&idcom=13110.

[SIIT, 2020a] SIIT (2020a). Reporte comunal 2020: Independencia; Sistema Integrado de Información Territorial; Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2020&idcom=13108.

[SIIT, 2020b] SIIT (2020b). Reporte comunal 2020: La Florida; Sistema Integrado de Información Territorial; Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2020&idcom=13110.

[Studio Roosegaarde, 2015] Studio Roosegaarde (2015). Smog Free Tower. https://www.studioroosegaarde.net/project/smog-free-tower.

[Studio Roosegaarde, 2019] Studio Roosegaarde (2019). Smog Free Bicycle. https://www.studioroosegaarde.net/project/smog-free-bicycle.

[Sánchez, 2018] Sánchez, E. (2018). La contaminación causó 38.600 muertes en España en 2015, una subida del 23 %. *El País.* https://elpais.com/sociedad/2018/10/29/actualidad/1540813829_874914.html.

[Sánchez et al., 1998a] Sánchez, J., Valdes, S., and Ostro, B. (1998a). Estimación de los beneficios en salud del plan de descontaminación de santiago. *El Trimestre Económico*, LXV (3):363–406.

[Sánchez et al., 1998b] Sánchez, J., Valdes, S., and Ostro, B. (1998b). Los efectos en salud de la contaminaciÓn atmosfÉrica por pm10 en santiago.

[Vargas R., 2011] Vargas R., C. (2011). Efectos de la fracción gruesa (PM10-2.5) del material particulado sobre la salud humana. Revisión Bibliográfica MINSAL https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2016/proyectos/efectos_en_la_salud_particulado_claudio_vargas_2011_minsal.pdf.

[Villanueva, 2019] Villanueva, A. (2019). Estas torres con microalgas fil-

tran el aire como lo harían 360 árboles. Tecnológico de Monterrey. https://tec.mx/es/noticias/nacional/emprendedores/estas-torres-con-microalgas-filtran-el-aire-como-lo-harian-360.

[Villarroel et al., 2010] Villarroel, C., Carrasco, J., Casassa, G., and Falvey, M. (2010). Validation of the climate version of the wrf in the northern patagonia icefield.

[Washam, 2009] Washam, C. (2009). Doble problema. la influenza intensifica los efectos del ozono. *Salud pública de México*, 51(3):272–273.

[Weblakes Software, 2021] Weblakes Software (2021). CALROADS VIEW: Traffic Air Dispersion Model. https://www.weblakes.com/software/air-dispersion/calroads-view/.

[Woodard, 1998] Woodard, K. (1998). Documento de Técnicas de Control de Materia Particulada Fina Proveniente de Fuentes Estacionarias https://www3.epa.gov/ttncatc1/dir1/pmcontech2.pdf.

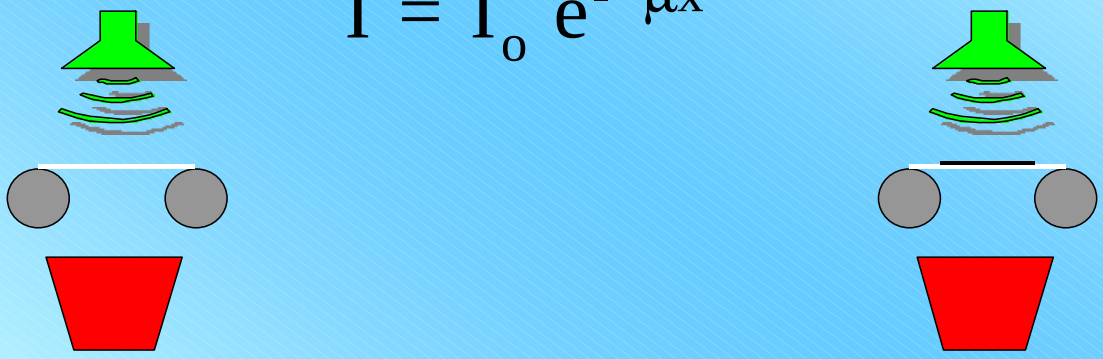
Anexos

Anexo A

Metodología de atenuación BETA-MET ONE 1020 según el principio de la ley de Beer.

PRINCIPIO DE OPERACION

$$I = I_o \, e^{-\mu x}$$



La ecuación es llamada la ***ley de Beer*** y describe como la energía (en este caso rayos beta) es absorbida por una molécula específica en una longitud de onda específica.

I es el conteo de Rayos Beta a través del papel filtro sucio (***conteo por unidad de tiempo***). I_o es el conteo de Rayos Beta a través del papel filtro limpio. μ es el ***area transversal de absorción*** del material que absorbe los Rayos Beta (cm^2/g) y ***x*** es la ***densidad de masa depositada*** en el papel filtro (g/cm^2).

Anexo B

Causas más frecuentes de defunciones en adulto mayor y en infantiles menores a 4 años por enfermedades al sistema respiratorio, año 2014.

Grupos de Edad	1	2	3	4	5
< 1 año	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	Malformaciones, congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas	Influenza y neumonía	Meningitis	Accidentes que obstruyen la respiración
65-69 años	Enfermedades isquémicas del corazón	Enfermedades cerebrovasculares	Cirrosis y otras enfermedades del hígado	Diabetes mellitus	Tumor malign del estómago
70-74 años	Enfermedades cerebrovasculares	Enfermedades isquémicas del corazón	Tumor malign del estómago	Cirrosis y otras enfermedades del hígado	Diabetes mellitus
75-79 años	Enfermedades cerebrovasculares	Enfermedades isquémicas del corazón	Diabetes mellitus	Enfermedades crónicas de las vías respiratorias inferiores	Tumor malign del estómago
80 y mas años	Enfermedades cerebrovasculares	Demencia y enfermedad de Alzheimer	Enfermedades isquémicas del corazón	Influenza y neumonía	Enfermedades hipertensivas

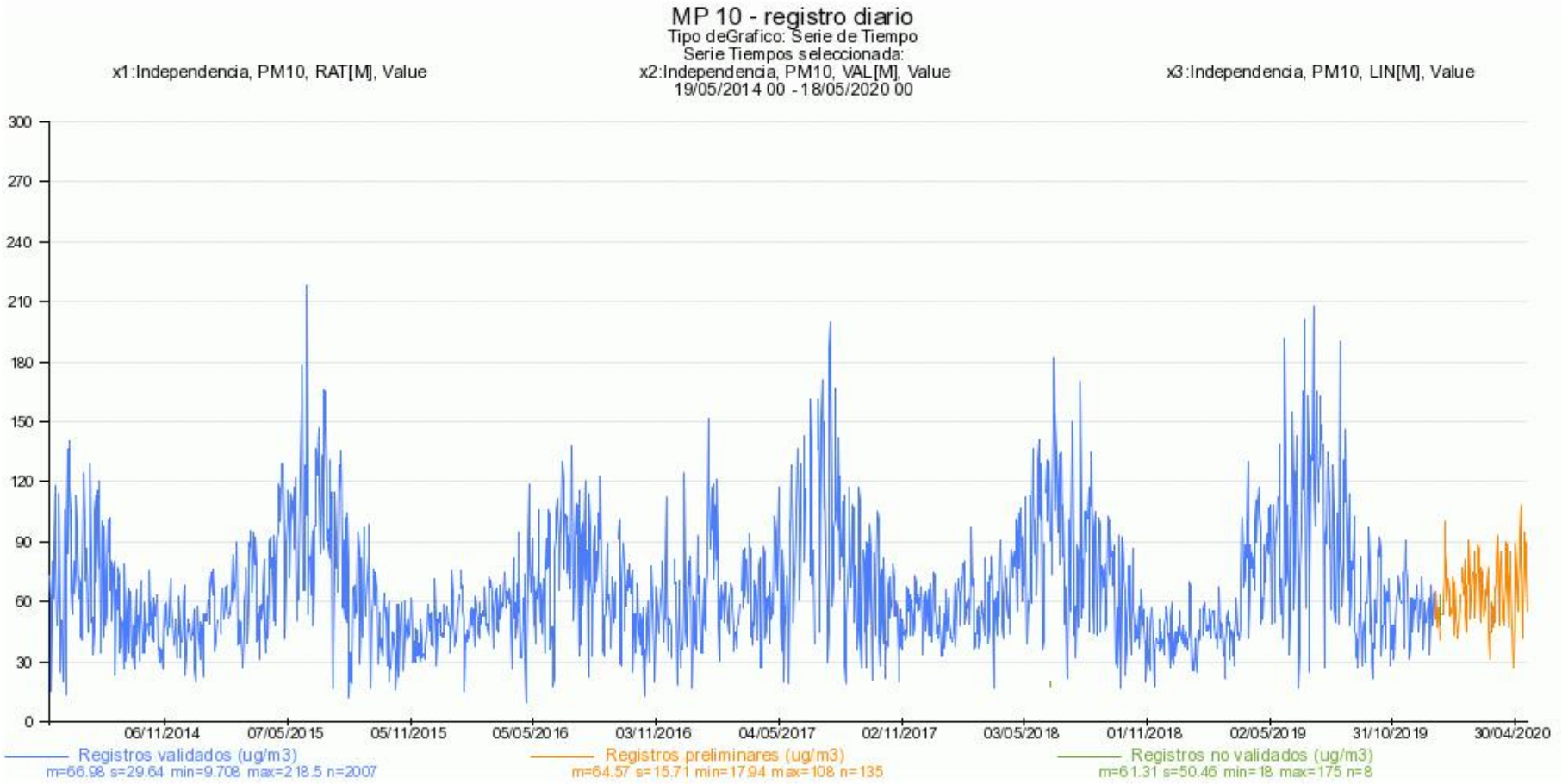
Anexo C

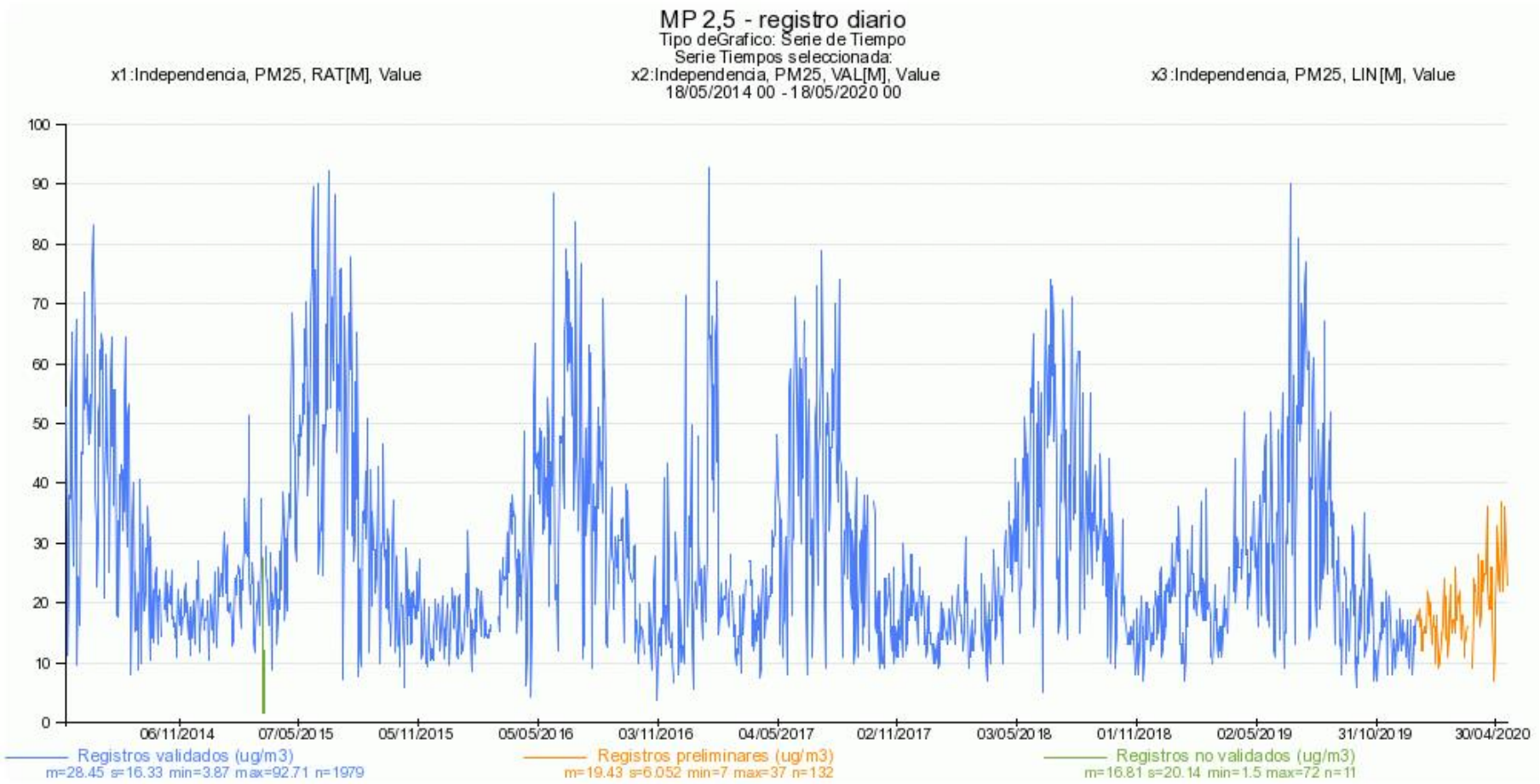
Principales edades de defunciones en población de tercera edad e infantiles menores a 1 año en la región Metropolitana a causa de enfermedades al sisema respiratorio, año 2014.

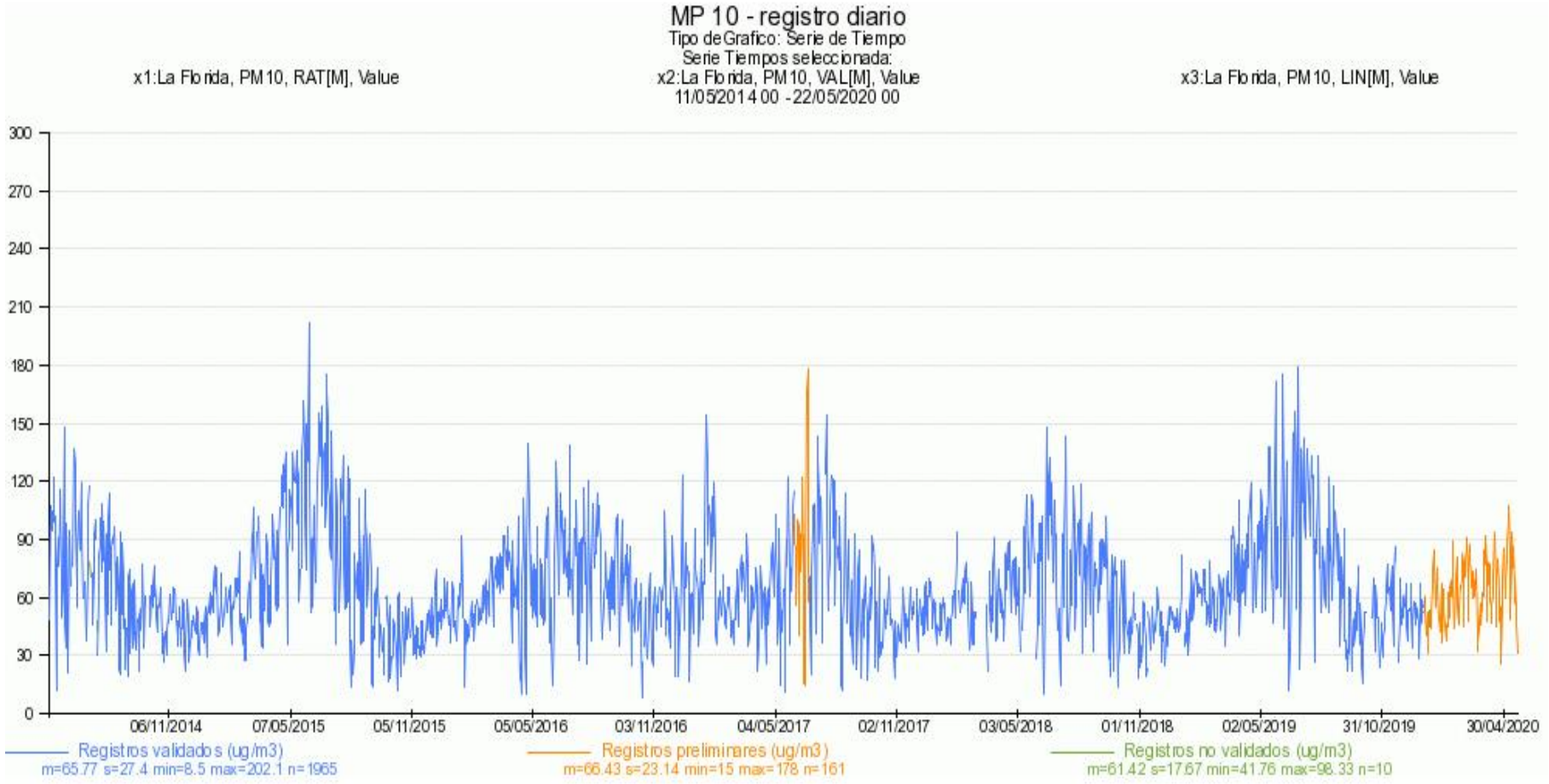
	Región, gran grupo de causa y sexo	Total	Grupo de edad (años)						
			0 a 4	55 a 59	60 a 64	65 a 69	70 a 74	75 a 79	80 +
Total País	Enfermedades al sistema respiratorio	**101.960**	**2.108**	**5.649**	**6.923**	**9.101**	**10.944**	**12.090**	**40.352**
	Hombres	53.975	1.128	3.538	4.248	5.558	6.334	6.524	16.584
	Mujeres	47.968	963	2.111	2.675	3.543	4.610	5.566	23.768
RM	Enfermedades al sistema respiratorio	4.193	19	125	168	253	383	511	2.519
	Hombres	2.027	9	85	94	166	214	284	1.032
	Mujeres	2.166	10	40	74	87	169	227	1.487

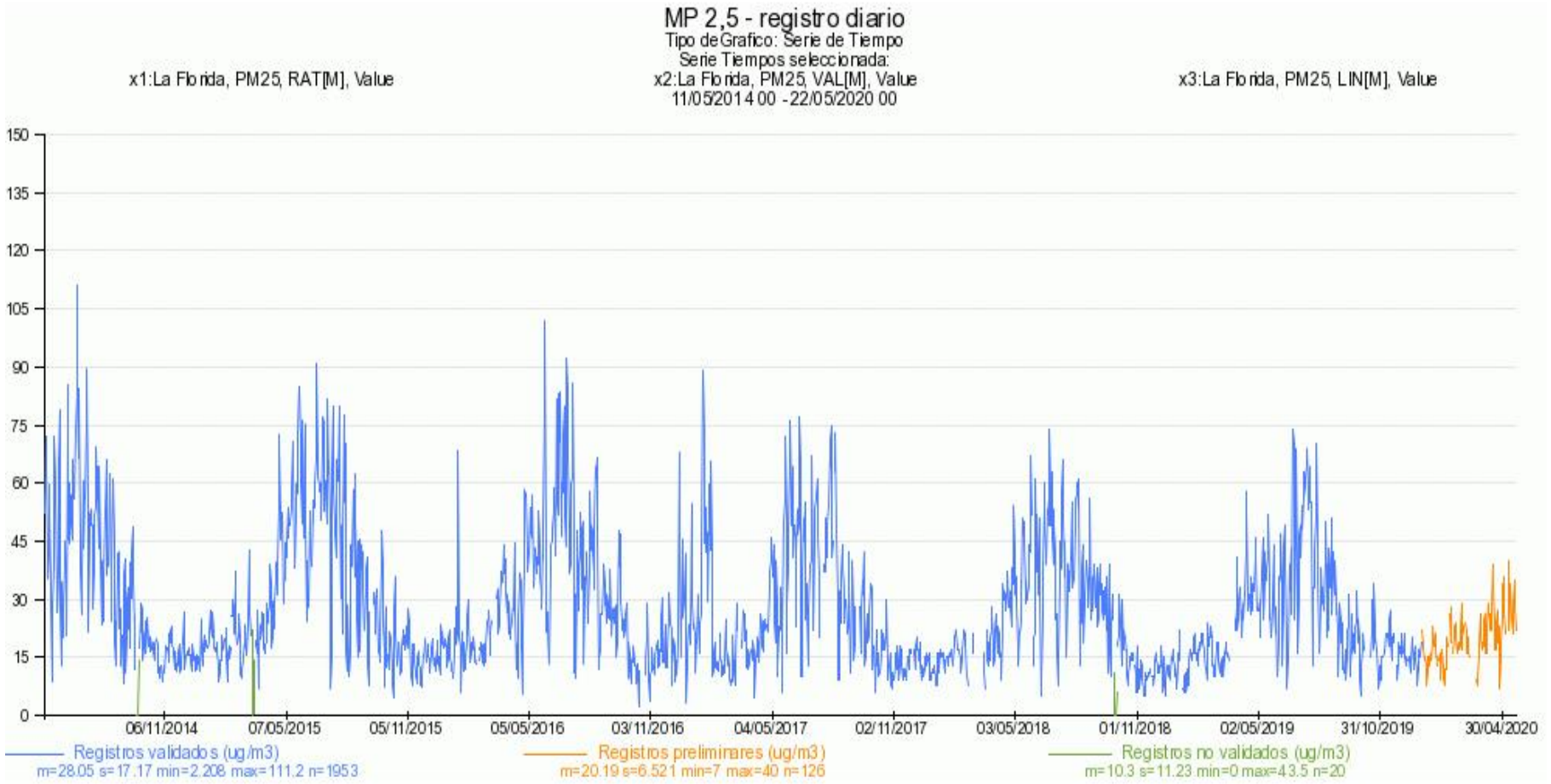
Anexo D

Niveles de concentración de MP10 y MP2.5 en las comunas de La Florida e Independencia en el año 2015 en función de los meses del año.


MP 10 - registro diario
Tipo deGrafico: Serie de Tiempo
Serie Tiempos seleccionada:
x1:Independencia, PM10, RAT[M], Value
x2:Independencia, PM10, VAL[M], Value
x3:Independencia, PM10, LIN[M], Value
19/05/2014 00 - 18/05/2020 00
300
270
240
210
180
150
120
90
60
30
0
06/11/2014
07/05/2015
05/11/2015
05/05/2016
03/11/2016
04/05/2017
02/11/2017
03/05/2018
01/11/2018
02/05/2019
31/10/2019
30/04/2020
Registros validados (ug/m3)
m=66.98 s=29.64 min=9.708 max=218.5 n=2007
Registros preliminares (ug/m3)
m=64.57 s=15.71 min=17.94 max=108 n=135
Registros no validados (ug/m3)
m=61.31 s=50.46 min=18 max=175 n=8


MP 2,5 - registro diario
Tipo deGrafico: Serie de Tiempo
Serie Tiempos seleccionada:
x1:Independencia, PM25, RAT[M], Value
x2:Independencia, PM25, VAL[M], Value
x3:Independencia, PM25, LIN[M], Value
18/05/2014 00 - 18/05/2020 00
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
06/11/2014
07/05/2015
05/11/2015
05/05/2016
03/11/2016
04/05/2017
02/11/2017
03/05/2018
01/11/2018
02/05/2019
31/10/2019
30/04/2020
Registros validados (ug/m3)
m=28.45 s=16.33 min=3.87 max=92.71 n=1979
Registros preliminares (ug/m3)
m=19.43 s=6.052 min=7 max=37 n=132
Registros no validados (ug/m3)
m=16.81 s=20.14 min=1.5 max=72 n=11


MP 10 - registro diario
Tipo de Grafico: Serie de Tiempo
Serie Tiempos seleccionada:
11/05/2014 00 - 22/05/2020 00
x1:La Florida, PM10, RAT[M], Value
x2:La Florida, PM10, VAL[M], Value
x3:La Florida, PM10, LIN[M], Value
300
270
240
210
180
150
120
90
60
30
0
06/11/2014
07/05/2015
05/11/2015
05/05/2016
03/11/2016
04/05/2017
02/11/2017
03/05/2018
01/11/2018
02/05/2019
31/10/2019
30/04/2020
Registros validados (ug/m3)
m=65.77 s=27.4 min=8.5 max=202.1 n=1965
Registros preliminares (ug/m3)
m=66.43 s=23.14 min=15 max=178 n=161
Registros no validados (ug/m3)
m=61.42 s=17.67 min=41.76 max=98.33 n=10


MP 2,5 - registro diario
Tipo de Grafico: Serie de Tiempo
Serie Tiempos seleccionada:
x1:La Florida, PM25, RAT[M], Value
x2:La Florida, PM25, VAL[M], Value
11/05/2014 00 - 22/05/2020 00
x3:La Florida, PM25, LIN[M], Value
150
135
120
105
90
75
60
45
30
15
0
06/11/2014
07/05/2015
05/11/2015
05/05/2016
03/11/2016
04/05/2017
02/11/2017
03/05/2018
01/11/2018
02/05/2019
31/10/2019
30/04/2020
Registros validados (ug/m3)
m=28.05 s=17.17 min=2.208 max=111.2 n=1953
Registros preliminares (ug/m3)
m=20.19 s=6.521 min=7 max=40 n=126
Registros no validados (ug/m3)
m=10.3 s=11.23 min=0 max=43.5 n=20

Anexo E

Ficha técnica SFT y pruebas realizada en estadio en China.

CONFIDENTIAL - Do not duplicate or distribute without written permission from Studio Roosegaarde

A3.2 ENS Technology 27
A3.3 Eindhoven University of Technology 27
Appendix 4: Acronyms and abbreviations 28

1. Executive summary

The underlying study was performed to validate the working of the 'Smog Free Tower' in a real-world, urban setting. The effect of the Smog Free Tower (SFT) on local concentrations of airborne fine dust were measured at the 'Minyuan Stadium' (figure 1) in the city of Tianjin (China), from April 2 through 11, 2017.



Figure 1. 3D image of the 'Minyuan Stadium' in the city of Tianjin (China), where the measurements were performed, including the location of the SFT.

1.1 Main results – airborne fine dust removal by means of positive ionization technology

The air purification systems that are located in the SFT were validated at:

- PM2.5-reduction: over 50%
- PM10-reduction: up to 71%

1.2 Main results – local impact of the Smog Free Tower

Based on a high-resolution computational grid of the SFT and on the measured reductions in fine dust concentration in the surroundings of the tower, a Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation was computed: Images generated from this CFD simulation visualize the reduction of airborne fine dust by the SFT in an urban environment (figure 2).

CONFIDENTIAL - Do not duplicate or distribute without written permission from Studio Roosegaarde

In near-zero wind speed conditions, PM10 reductions of up to 70% are achieved near the tower outlets. Reductions of almost 45% PM10 are achieved up to a considerable distance downstream, in a circle of more than 10 m radius around the tower. PM2.5 reductions of about 50% are achieved near the tower outlets, while reductions larger than 25% are achieved in a circle of more than 10 m radius around the tower. The large reduction of PM2.5 is of special interest, since smaller particles penetrate deeper into the respiratory system and are therefore more detrimental to the health.

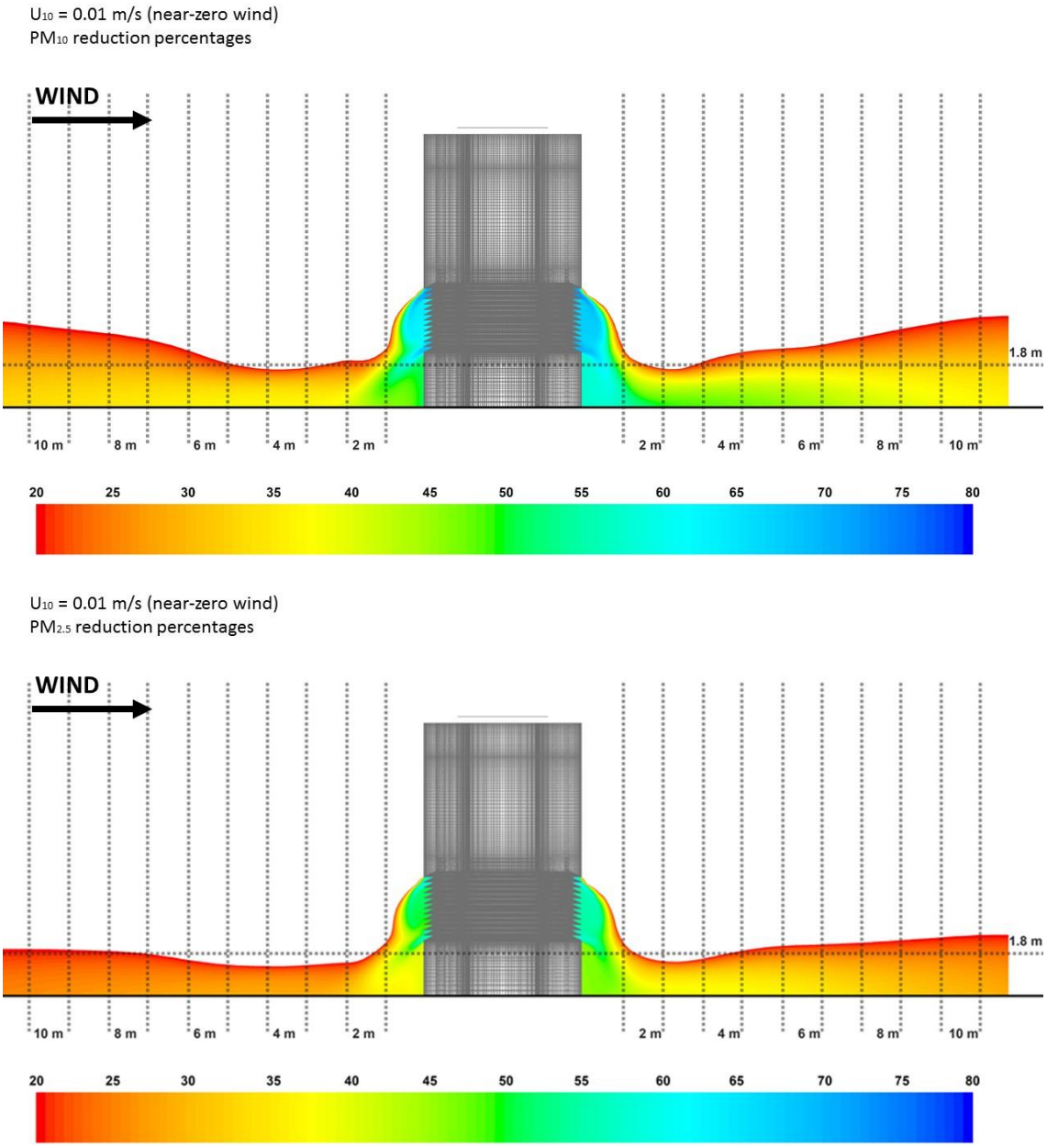


Figure 2. 3D representation of the CFD simulation depicting the reduction in PM10 (top panel) and PM2.5 (bottom panel) in the surroundings of the SFT, in near-zero wind conditions. The figure is slightly asymmetric due to the imposed 0.01 m/s wind speed.

CONFIDENTIAL - Do not duplicate or distribute without written permission from Studio Roosegaarde

In conclusion, the SFT, under stable conditions, generates and sustains a large effect area its vicinity. Within this effect area, the concentration of airborne fine dust is significantly lowered at close proximity to the SFT; this effect decreases gradually at increasing distance from the SFT.

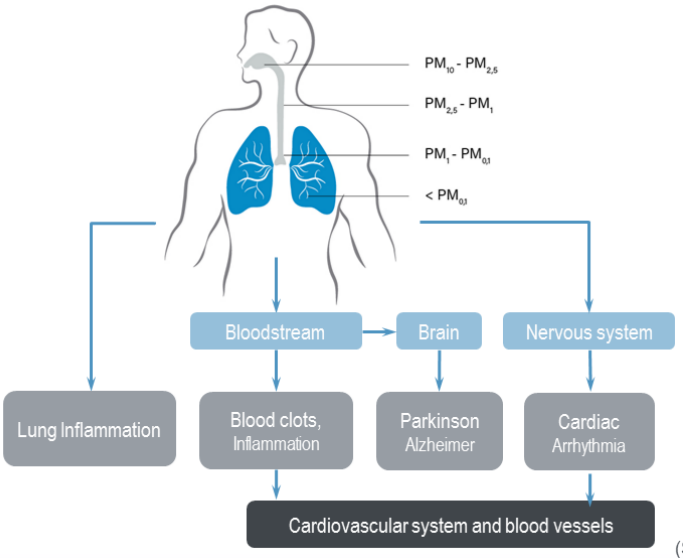
2. Introduction: Air pollution

Air pollution is defined as "contamination of the indoor or outdoor environment by any chemical, physical, or biological agent that modifies the natural characteristics of the atmosphere" (source: WHO).
Human activities are major sources of air pollution: Industrial processes and traffic movement emit large quantities of inhalable and respirable Particulate Matter (PM_{10}, $PM_{2.5}$, and $PM_{0.1}$), heavy metals, and various toxic waste gasses (e.g., nitrogen oxides (NOx), sulfur oxides (SOx), volatile organic compounds (VOCs), and ozone (O3)). These airborne pollutants orchestrate a very complex series of atmospheric chemical reactions, significantly add to the overall air pollution level, and thus pose a major burden for public health and the environment.

2.1 Risks and cost of urban air pollution

Fine and ultrafine dust are increasingly recognized as a public health risk (figure 3). Exposure to airborne particulate matter (PM) is associated with increased mortality, reduced life expectancy, and hospital admissions due to respiratory and cardiovascular diseases. An estimated 3.2 million annual premature deaths were attributable to $PM_{2.5}$ exposure in 2010, the ninth leading risk factor for early death. In the EU and US combined the monetary impact of outdoor air pollution in 2010 is estimated to US$1.7 trillion, in China US$1.4 trillion, and in India US$0.5 trillion (due to death and illness).

2.2 Battle against urban air pollution



(Source: RIVM, 2013)

Figure 3. Overview of the health effects of inhaled Particulate Matter (PM). Following inhalation, PM may cause a range of adverse effects, amongst which respiratory, cardiovascular, and neurological diseases. The health-impact of PM increases with decreasing size, due to the deeper penetration into the respiratory and/ or cardiovascular system.

CONFIDENTIAL - Do not duplicate or distribute without written permission from Studio Roosegaarde

Urban outdoor air pollution refers to: "the air pollution experienced by populations living in and around urban areas" (definition: WHO). High concentrations of airborne pollutants in the urban environment urges governments and individual residents to implement measures to eliminate these pollutants from the air. Initiatives such as the ´Smog Free Project´, as initiated by Studio Roosegaarde, aim at creating public areas of cleaned air to be enjoyed by the general public.

2.3 Measurement of airborne fine dust

Accurate measurement of airborne fine dust is a highly specialized activity, due to the complex interplay of the local environment (e.g., structures that interfere with air flow), actual meteorological conditions (e.g., wind, precipitation, temperature, and relative humidity), and various technical issues (e.g., air mixing issues and location of the sampling tube to obtain an isokinetic air flow). Moreover, high-end certified equipment is very expensive, fragile, and requires proper maintenance and calibration. Despite conscientious execution of measurements and taking into account as many variables as possible, a certain degree of uncertainty regarding the outcome of fine dust measurements always remains. In the underlying study, great care was taken to exclude and/ or minimize undesired effects as a result of such factors/ confounders and technical error.

3. Smog Free Project

The Smog Free Project is developed by Daan Roosegaarde in collaboration with the engineers and designers of Studio Roosegaarde, ENS Technology, and advisor Ursem (until 2013). The Smog Free Project is a solution for clean urban environments (parks), and serves as a sensory experience of a clean future. After the initial pilot in Rotterdam (2015), the Smog Free Project is currently on tour in China (Beijing: 2016 and Tianjin: 2017).

3.1 Smog Free Tower

The physical implementation of the Smog Free project consists of the Smog Free Tower (Figure 4) designed by Studio Roosegaarde. The Smog Free Tower contains an air purification system that is based on ENS Technology's patented positive ionization technology. The Smog Free Tower cleans approximately 30.000 m^3 of ambient air per hour (this amounts to approximately 263 million m^3 per year), consumes only a small mount of electricity, and could therefore run on 'green' solar or wind energy.



Figure 4. The Smog Free Tower, as located at Minyuan Stadium, Tianjin, China.

CONFIDENTIAL - Do not duplicate or distribute without written permission from Studio Roosegaarde

4. Aim of this study

The aim of the underlying study is to validate the working of the 'Smog Free Tower' in an urban setting that suffers from significantly elevated concentrations of airborne fine and ultrafine dust. The measurements on which this study is based were performed between April 2-11, 2017, at the 'Minyuan Stadium' in the city of Tianjin (China).

5. Results

Measurements and data processing were performed by skilled and experienced personnel, using certified high-end measuring equipment, and CFD simulations were performed by the research group of Professor B. Blocken (Eindhoven University of Technology, the Netherlands), a renowned academic group that is world-leading in this field.

5.1 Validation of the air cleaning capacity of the air purification systems

'Aufero' air purification systems were designed and developed for the efficient elimination of fine and ultrafine dust from large volumes of air. To validate the efficiency of the air purification system systems that are located in the SFT, concentrations of fine dust (0.3-10 µm aerodynamic diameter) were measured in the ingoing and in the outgoing air streams of the individual air purification system systems. By calculating the difference between the fine dust concentration in the ingoing versus the outgoing air, the percentage reduction can be calculated (see table 1). During all measurements, the systems were operating at full capacity (treatment of approximately 10,000 m3 air per hour).

System	Orientation	PM2.5 reduction (%)	PM10 reduction (%)
Aufero-1	North	54	68
Aufero-2	South-East	53	71
Aufero-3	South-West	52	65

Table 1. Summarized reduction efficiencies of the individual air purification systems for PM2.5 and PM10 (percent reduction between outgoing vs. ingoing air).

To illustrate the fine dust elimination capacity of the air purification systems, visual inspections of the collection plates were performed: Following 7 days of operation after thorough cleaning, a build-up of collected fine dust was visible to the naked eye (figure 5).

Anexo F

Noticia de implementación exitosa en China de la SFT.

Beijing, 22nd of November 2016 - 1.2

SUCCESS FOR ROOSEGAARDE'S FIRST SMOG FREE TOWER IN CHINA

China's Ministry of Environmental Protection reports 55% cleaner air in the vicinity of the Smog Free Tower.

Dutch designer & innovator, Daan Roosegaarde, presents successful test results of the world's largest smog vacuum cleaner in Beijing, China. The Smog Free Project, consisting of the Smog Free Tower and Smog Free Jewellery, concluded the first chapter of its China tour in Beijing. Following its successful Beijing exhibition, Smog Free Project will continue its China tour to more Chinese cities.



Daan Roosegaarde and the Chinese Ministry of Environmental Protection present to international press

Anexo G

Desarrollo del método APH para la selección de la comuna a instalar el equipo.

Metodología de implementación del análisis de procesos jerárquicos (APH).

1) Primeramente se deben identificar los criterios o condiciones más importantes a considerar en el estudio. Se deben cumplir que todos los candidatos para la selección del lugar a implementar el proyecto, posean todos los criterios. El grado de importancia que se le otorga a la diferencia entre los resultados de la comparación de un criterio entre 2 candidatos se cataloga mediante una escala del 1 al 9, siendo 1, el mismo nivel de importancia de ese criterio para ambos candidatos, y 9, una extrema importancia para escoger un candidato sobre otro bajo el punto de vista del criterio comparado, ejemplo: 2 comunas poseen misma cantidad aproximada de TMC, por lo que la puntuación entre ambas comunas es 1, si hay diferencias, por cada 10% de diferencia se irá aumentando la numeración. A continuación se presenta la tabla de valoración.

Matriz de Valoración

Escala Numérica	Escala Verbal	Explicación
1	Igual importancia	Ambos criterios contribuyen por igual al objetivo
3	Importancia moderada de un criterio sobre otro	El juicio y la experiencia están a favor de un criterio sobre otro
5	Importancia fuerte de un criterio sobre otro	Un criterio es fuertemente favorecido
7	Importancia muy fuerte de un criterio sobre otro	Un criterio es muy dominante
9	Extrema importancia de un criterio sobre otro	Un criterio es favorecido por al menos un orden de magnitud de diferencia
2,4,6,8	Valores intermedio entre dos criterios adyacentes	Se usan como compromiso entre dos juicios

2) Posterior a esto primeramente se desarrolla una matriz de comparación entre todos los criterios, la importancia de uno sobre otro está dada apreciativamente por los encargados del estudio. Para éste caso se utilizaron los 7 criterios mencionados anteriormente en el ítem de Método para identificar el sector óptimo para la implementación de la SFT. Posterior a esto la matriz es normalizada y se calcula el Vector de prioridades como el promedio de cada fila. A continuación se presenta la matriz de valoración entre los criterios y la matriz normalizada de ésta:

matriz de valoracion de criterios

Criterio	Historial MP10	Historial MP2.5	Población de riesgo menor a 4 años	Población de riesgo mayor a 60 años	Densidad Poblacional	TMC	TMA
Historial de MP10	1	1/5	1/4	1/6	1/9	1/3	1/4
Historial de MP2.5	5	1	4	2	2	3	2
Población de riesgo menor a 4 años	4	1/4	1	1/5	1/7	1/3	1/5
Población de riesgo mayor a 60 años	6	1/2	5	1	3	5	4
Densidad Poblacional	9	1/2	7	1/3	1	3	4
TMC	3	1/3	3	1/5	1/3	1	1/3
TMA	4	1/2	5	1/4	1/4	3	1
Sumatoria	32	3,28	20,25	4,15	3,84	10,67	7,78

matriz de valoracion normalizada de criterios

Criterio	Historial MP10	Historial MP2.5	Población de riesgo menor a 4 años	Población de riesgo mayor a 60 años	Densidad Poblacional	TMC	TMA	Vector prioridades
Historial de MP10	0,031	0,061	0,012	0,040	0,029	0,031	0,032	0,034
Historial de MP2.5	0,156	0,305	0,198	0,482	0,521	0,281	0,257	0,314
Población de riesgo menor a 4 años	0,125	0,076	0,049	0,048	0,037	0,031	0,026	0,056
Población de riesgo mayor a 60 años	0,188	0,152	0,247	0,241	0,781	0,469	0,514	0,370
Densidad Poblacional	0,281	0,152	0,346	0,080	0,260	0,281	0,514	0,274
TMC	0,094	0,102	0,148	0,048	0,087	0,094	0,043	0,088
TMA	0,125	0,152	0,247	0,060	0,065	0,281	0,129	0,151

3) El siguiente paso es comparar cada candidato (comunas) entre todas bajo un mismo criterio y puntuando la supremacía de un criterio entre una sobre otra según la matriz de valoración anteriormente expuesta. Se realiza un total de 7 matrices de comparación entre comunas, una matriz para cada criterio. Posteriormente la matriz es normalizada y se calcula de la misma manera el vector promedio de cada matriz.

Matriz de comparación de criterio: Historial Promedio de MP10

	Puente alto	El Bosque	La Florida	Parque O'higgins	Pudahuel	Cerro Navia	Independencia	Las Condes	Quilicura
Puente alto	1	1/8	1/7	1/4	1/5	1/3	1/2	3	1/2
El Bosque	8	1	2	3	3	4	5	8	7
La Florida	7	1/2	1	4	3	5	6	8	7
Parque O'Higgins	4	1/3	1/4	1	1/2	4	5	7	6
Pudahuel	5	1/3	1/3	2	1	3	4	7	5
Cerro Navia	3	1/4	1/5	1/4	1/3	1	2	7	6
Independencia	2	1/5	1/6	1/5	1/4	1/2	1	6	4
Las Condes	1/3	1/8	1/8	1/7	1/7	1/7	1/6	1	1/5
Quilicura	2	1/7	1/7	1/6	1/5	1/6	1/4	5	1
Suma	32,33	3,01	4,36	11,01	8,63	18,14	23,92	52,00	36,70

Matriz normalizada de criterio: Historial Promedio de MP10 Normalizada

	Puente alto	El Bosque	La Florida	Parque O'higgins	Pudahuel	Cerro Navia	Independencia	Las Condes	Quilicura	Vector Promedio
Puente alto	0,031	0,042	0,033	0,023	0,023	0,018	0,021	0,058	0,014	0,029
El Bosque	0,247	0,332	0,459	0,272	0,348	0,220	0,209	0,154	0,191	0,270
La Florida	0,216	0,166	0,229	0,363	0,348	0,276	0,251	0,154	0,191	0,244
Parque O'Higgins	0,124	0,111	0,057	0,091	0,058	0,220	0,209	0,135	0,163	0,130

Pudahuel	0,155	0,111	0,076	0,182	0,116	0,165	0,167	0,135	0,136	0,138
Cerro Navia	0,093	0,083	0,046	0,023	0,039	0,055	0,084	0,135	0,163	0,080
Independencia	0,062	0,066	0,038	0,018	0,029	0,028	0,042	0,115	0,109	0,056
Las Condes	0,010	0,042	0,029	0,013	0,017	0,008	0,007	0,019	0,005	0,017
Quilicura	0,062	0,047	0,033	0,015	0,023	0,009	0,010	0,096	0,027	0,036

Matriz de comparación de criterio: Historial Promedio de MP2.5

	Puente alto	El Bosque	La Florida	Parque O'higgins	Pudahuel	Cerro Navia	Independencia	Las Condes	Quilicura
Puente alto	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	2	1/2
El Bosque	3	1	2	1	2	1	4	6	4
La Florida	3	1/2	1	1	1	1	4	6	4
Parque O'Higgins	3	1	1	1	1	1	4	6	4
Pudahuel	3	1/2	1	1	1	1	4	6	4
Cerro Navia	3	1	1	1	1	1	4	6	4
Independencia	2	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1	3	1
Las Condes	1/2	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/3	1	3
Quilicura	2	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1	0,33	1
Suma	20,50	5,00	7,00	6,00	7,00	6,00	22,83	36,33	25,50

Matriz de comparación normalizada de criterio: Historial Promedio de MP2.5 Normalizada

	Puente alto	El Bosque	La Florida	Parque O'higgins	Pudahuel	Cerro Navia	Independencia	Las Condes	Quilicura	Vector Promedio
Puente alto	0,049	0,067	0,048	0,056	0,048	0,056	0,022	0,055	0,020	0,046
El Bosque	0,146	0,200	0,286	0,167	0,286	0,167	0,175	0,165	0,157	0,194
La Florida	0,146	0,100	0,143	0,167	0,143	0,167	0,175	0,165	0,157	0,151
Parque O'Higgins	0,146	0,200	0,143	0,167	0,143	0,167	0,175	0,165	0,157	0,163

Pudahuel	0,146	0,100	0,143	0,167	0,143	0,167	0,175	0,165	0,157	0,151
Cerro Navia	0,146	0,200	0,143	0,167	0,143	0,167	0,175	0,165	0,157	0,163
Independencia	0,098	0,050	0,036	0,042	0,036	0,042	0,044	0,083	0,039	0,052
Las Condes	0,024	0,033	0,024	0,028	0,024	0,028	0,015	0,028	0,118	0,036
Quilicura	0,098	0,050	0,036	0,042	0,036	0,042	0,044	0,009	0,039	0,044

Matriz de comparación de criterio: Cantidad de población de riesgo menor a 4 años

	Puente alto	El Bosque	La Florida	Parque O'higgins	Pudahuel	Cerro Navia	Independencia	Las Condes	Quilicura
Puente alto	1	1	1	1	1	1	1	1	1
El Bosque	1	1	1/4	1	1/3	2	2	1/3	1/4
La Florida	1	4	1	1	4	5	6	3	4
Parque O'Higgins	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Pudahuel	1	3	1/4	1	1	3	4	1/2	2
Cerro Navia	1	1/2	1/5	1	1/3	1	2	1/3	1/3
Independencia	1	1/2	1/6	1	1/4	1/2	1	1/4	1/3
Las Condes	1	3	1/3	1	2	3	4	1	2
Quilicura	1	4	1/4	1	1/2	3	3	1/2	1
Suma	9,00	18,00	4,45	9,00	10,42	19,50	24,00	7,92	11,92

Matriz normalizada de criterio

	Puente alto	El Bosque	La Florida	Parque O'higgins	Pudahuel	Cerro Navia	Independencia	Las Condes	Quilicura	Vector Promedio
Puente alto	0,111	0,056	0,225	0,111	0,096	0,051	0,042	0,126	0,084	0,100
El Bosque	0,111	0,056	0,056	0,111	0,032	0,103	0,083	0,042	0,021	0,068
La Florida	0,111	0,222	0,225	0,111	0,384	0,256	0,250	0,379	0,336	0,253
Parque O'Higgins	0,111	0,056	0,225	0,111	0,096	0,051	0,042	0,126	0,084	0,100

Pudahuel	0,111	0,167	0,056	0,111	0,096	0,154	0,167	0,063	0,168	0,121
Cerro Navia	0,111	0,028	0,045	0,111	0,032	0,051	0,083	0,042	0,028	0,059
Independencia	0,111	0,028	0,037	0,111	0,024	0,026	0,042	0,032	0,028	0,049
Las Condes	0,111	0,167	0,075	0,111	0,192	0,154	0,167	0,126	0,168	0,141
Quilicura	0,111	0,222	0,056	0,111	0,048	0,154	0,125	0,063	0,084	0,108

Matriz de comparación de criterio: Cantidad de poblacion de riesgo mayor a 60 años

	Puente alto	El Bosque	La Florida	Parque O'higgins	Pudahuel	Cerro Navia	Independencia	Las Condes	Quilicura
Puente alto	1	1	1	1	1	1	1	1	1
El Bosque	1	1	1/7	1	1	2	3	1/4	3
La Florida	1	7	1	1	6	7	8	3	6
Parque O'Higgins	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Pudahuel	1	1	1/6	1	1	2	3	1/4	3
Cerro Navia	1	1/2	1/7	1	1/2	1	2	1/5	2
Independencia	1	1/3	1/8	1	1/3	1/2	1	1/7	1/2
Las Condes	1	4	1/3	1	4	5	7	1	5
Quilicura	1	1/3	1/6	1	1/3	1	2	1/5	1
Suma	9,00	16,17	4,08	9,00	15,17	20,00	28,00	7,04	22,50

Matriz de comparación normalizada de criterio: Cantidad de poblacion de riesgo mayor a 60 años

	Puente alto	El Bosque	La Florida	Parque O'higgins	Pudahuel	Cerro Navia	Independencia	Las Condes	Quilicura	Vector Promedio
Puente alto	0,111	0,062	0,245	0,111	0,066	0,050	0,036	0,142	0,044	0,096
El Bosque	0,111	0,062	0,035	0,111	0,066	0,100	0,107	0,035	0,133	0,085
La Florida	0,111	0,433	0,245	0,111	0,396	0,350	0,286	0,426	0,267	0,292
Parque O'Higgins	0,111	0,062	0,245	0,111	0,066	0,050	0,036	0,142	0,044	0,096

Pudahuel	0,111	0,062	0,041	0,111	0,066	0,100	0,107	0,035	0,133	0,085
Cerro Navia	0,111	0,031	0,035	0,111	0,033	0,050	0,071	0,028	0,089	0,062
Independencia	0,111	0,021	0,031	0,111	0,022	0,025	0,036	0,020	0,022	0,044
Las Condes	0,111	0,247	0,082	0,111	0,264	0,250	0,250	0,142	0,222	0,187
Quilicura	0,111	0,021	0,041	0,111	0,022	0,025	0,071	0,028	0,044	0,053

Matriz de comparación de criterio: Densidad poblacional adulto mayor

	Puente alto	El Bosque	La Florida	Parque O'higgins	Pudahuel	Cerro Navia	Independencia	Las Condes	Quilicura
Puente alto	1	1	1	1	1	1	1	1	1
El Bosque	1	1	5	1	7	1	1/2	6	8
La Florida	1	1/5	1	1	7	1/4	1/6	3	6
Parque O'Higgins	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Pudahuel	1	1/7	1/7	1	1	1/9	1/9	1/3	1/3
Cerro Navia	1	1	4	1	9	1	1/2	8	9
Independencia	1	2	6	1	9	2	1	8	8
Las Condes	1	1/6	1/3	1	3	1/8	1/8	1	3
Quilicura	1	1/8	1/6	1	3	1/9	1/8	1/3	1
Suma	9,00	6,63	18,64	9,00	41,00	6,60	4,53	28,67	37,33

Matriz normalizada de comparación de criterio: Densidad poblacional adulto mayor

	Puente alto	El Bosque	La Florida	Parque O'higgins	Pudahuel	Cerro Navia	Independencia	Las Condes	Quilicura	Vector Promedio
Puente alto	0,111	0,151	0,054	0,111	0,024	0,152	0,221	0,035	0,027	0,098
El Bosque	0,111	0,151	0,268	0,111	0,171	0,152	0,110	0,209	0,214	0,166
La Florida	0,111	0,030	0,054	0,111	0,171	0,038	0,037	0,105	0,161	0,091
Parque O'Higgins	0,111	0,151	0,054	0,111	0,024	0,152	0,221	0,035	0,027	0,098

Pudahuel	0,111	0,022	0,008	0,111	0,024	0,017	0,025	0,012	0,009	0,038
Cerro Navia	0,111	0,151	0,215	0,111	0,220	0,152	0,110	0,279	0,241	0,177
Independencia	0,111	0,301	0,322	0,111	0,220	0,303	0,221	0,279	0,214	0,231
Las Condes	0,111	0,025	0,018	0,111	0,073	0,019	0,028	0,035	0,080	0,056
Quilicura	0,111	0,019	0,009	0,111	0,073	0,017	0,028	0,012	0,027	0,045

Matriz de comparación de criterio: TMA

	Puente alto	El Bosque	La Florida	Parque O'higgins	Pudahuel	Cerro Navia	Independencia	Las Condes	Quilicura
Puente alto	1	1	1	1	1	1	1	1	1
El Bosque	1	1	3	1	1/3	1/2	1/7	5	3
La Florida	1	1/3	1	1	1/4	1/3	1/5	3	1/2
Parque O'Higgins	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Pudahuel	1	3	4	1	1	2	1/4	7	3
Cerro Navia	1	2	3	1	1/2	1	1/4	5	3
Independencia	1	7	5	1	4	4	1	7	6
Las Condes	1	1/5	1/3	1	1/7	1/5	1/7	1	1/3
Quilicura	1	1/3	2	1	1/3	1/3	1/6	3	1
Suma	9,00	15,87	20,33	9,00	8,56	10,37	4,15	33,00	18,83

Matriz normalizada de comparación de criterio: TMA

	Puente alto	El Bosque	La Florida	Parque O'higgins	Pudahuel	Cerro Navia	Independencia	Las Condes	Quilicura	Vector Promedio
Puente alto	0,111	0,063	0,049	0,111	0,117	0,096	0,241	0,030	0,053	0,097
El Bosque	0,111	0,063	0,148	0,111	0,039	0,048	0,034	0,152	0,159	0,096
La Florida	0,111	0,021	0,049	0,111	0,029	0,032	0,048	0,091	0,027	0,058
Parque O'Higgins	0,111	0,063	0,049	0,111	0,117	0,096	0,241	0,030	0,053	0,097
Pudahuel	0,111	0,189	0,197	0,111	0,117	0,193	0,060	0,212	0,159	0,150
Cerro Navia	0,111	0,126	0,148	0,111	0,058	0,096	0,060	0,152	0,159	0,114

Independencia	0,111	0,441	0,246	0,111	0,467	0,386	0,241	0,212	0,319	0,282
Las Condes	0,111	0,013	0,016	0,111	0,017	0,019	0,034	0,030	0,018	0,041
Quilicura	0,111	0,021	0,098	0,111	0,039	0,032	0,040	0,091	0,053	0,066

Matriz de comparación de criterio: TMC

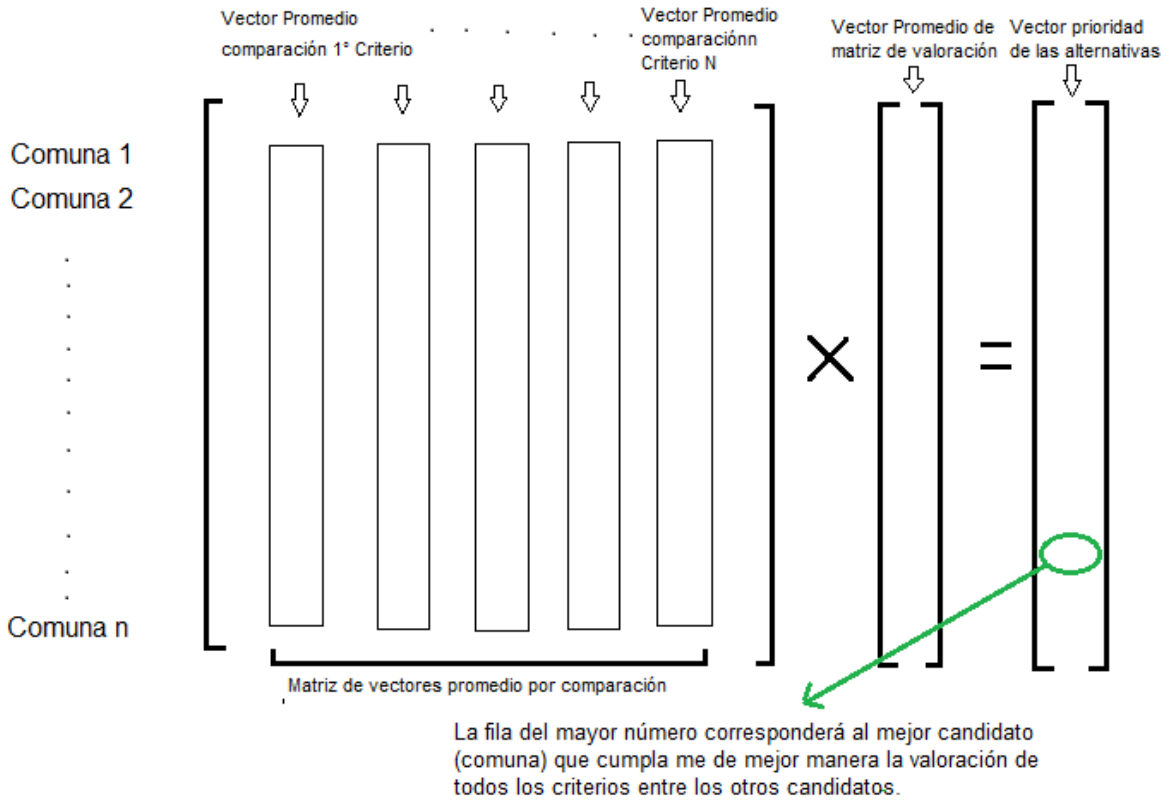
	Puente alto	El Bosque	La Florida	Parque O'higgins	Pudahuel	Cerro Navia	Independencia	Las Condes	Quilicura
Puente alto	1	1	1	1	1	1	1	1	1
El Bosque	1	1	3	1	4	1/3	1/7	1/2	8
La Florida	1	1/3	1	1	4	1/3	1/7	1/3	6
Parque O'Higgins	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Pudahuel	1	1/4	1/4	1	1	1/4	1/8	1/4	5
Cerro Navia	1	3	3	1	4	1	1/4	1	7
Independencia	1	7	7	1	8	4	1	4	9
Las Condes	1	2	3	1	4	1	1/4	1	7
Quilicura	1	1/8	1/6	1	5	1/7	1/9	1/7	1
Suma	9,00	15,71	19,42	9,00	32,00	9,06	4,02	9,23	45,00

Matriz normalizada de comparación de criterio: TMC

	Puente alto	El Bosque	La Florida	Parque O'higgins	Pudahuel	Cerro Navia	Independencia	Las Condes	Quilicura	Vector Promedio
Puente alto	0,111	0,064	0,052	0,111	0,031	0,110	0,249	0,108	0,022	0,095
El Bosque	0,111	0,064	0,155	0,111	0,125	0,037	0,036	0,054	0,178	0,097
La Florida	0,111	0,021	0,052	0,111	0,125	0,037	0,036	0,036	0,133	0,074
Parque O'Higgins	0,111	0,064	0,052	0,111	0,031	0,110	0,249	0,108	0,022	0,095
Pudahuel	0,111	0,016	0,013	0,111	0,031	0,028	0,031	0,027	0,111	0,053
Cerro Navia	0,111	0,191	0,155	0,111	0,125	0,110	0,062	0,108	0,156	0,125

Independencia	0,111	0,446	0,361	0,111	0,250	0,442	0,249	0,434	0,200	0,289
Las Condes	0,111	0,127	0,155	0,111	0,125	0,110	0,062	0,108	0,156	0,118
Quilicura	0,111	0,008	0,009	0,111	0,156	0,016	0,028	0,015	0,022	0,053

4) Una vez obtenidos todos los vectores promedio de cada matriz finalmente se agrupan en una matriz de prioridades para cada candidato respecto a cada criterio, se calcula el vector ponde la cual es multiplicada por el vector promedio de la matriz de valoración de criterios (con la operación suma producto), el resultado es presentado en el vector prioridad de cada alternativa, escogiendo como candidato al que presente mayor valor:

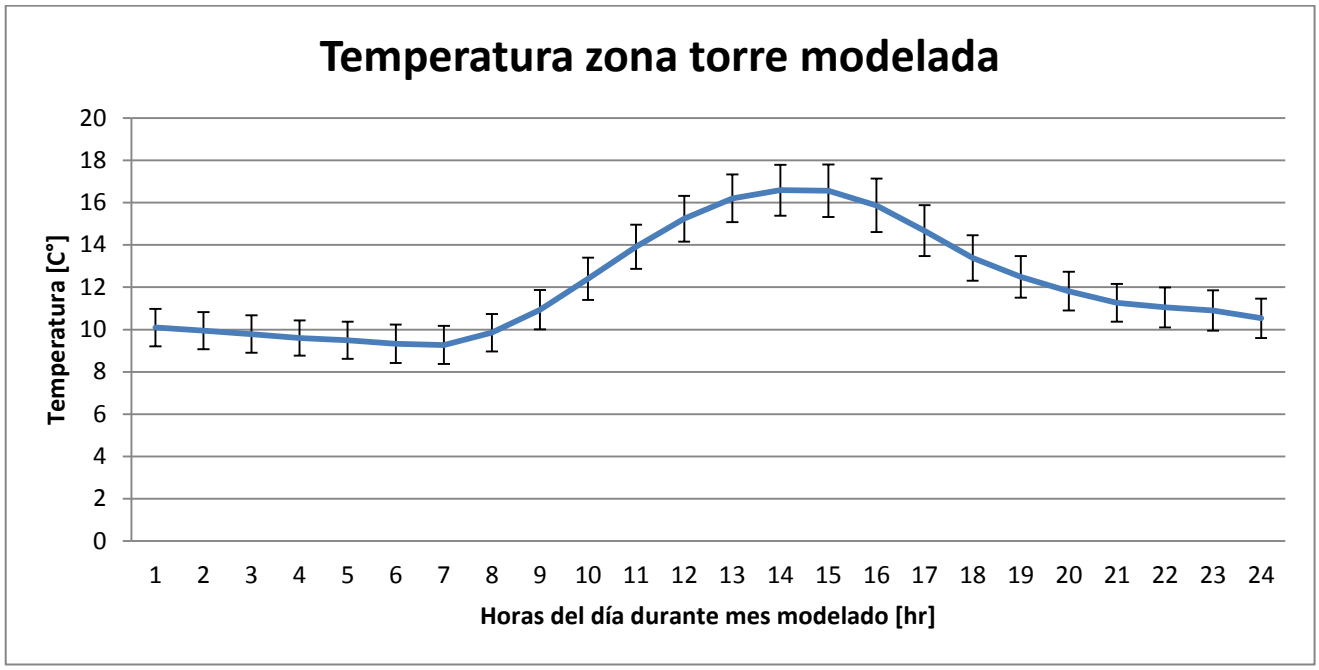


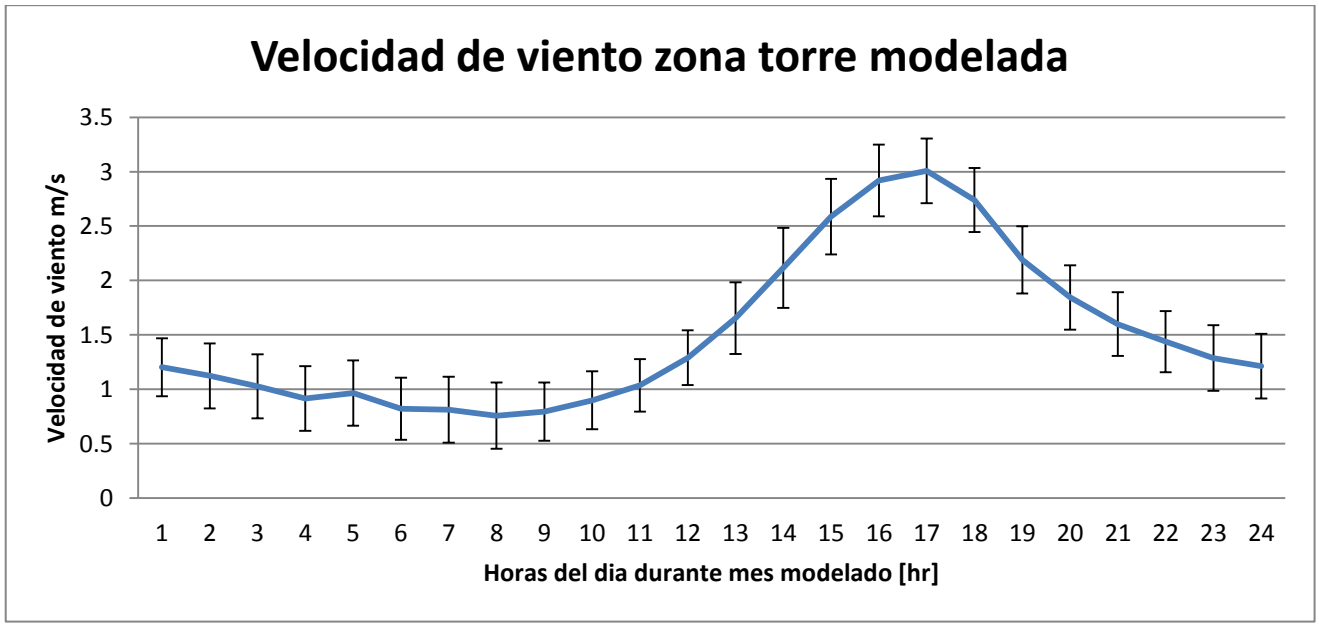
Se presenta a continuación la matriz de vectores promedio, el vector promedio de valoración (en éste caso debajo de la matriz) y el resultado final del vector prioridad entre los candidatos:

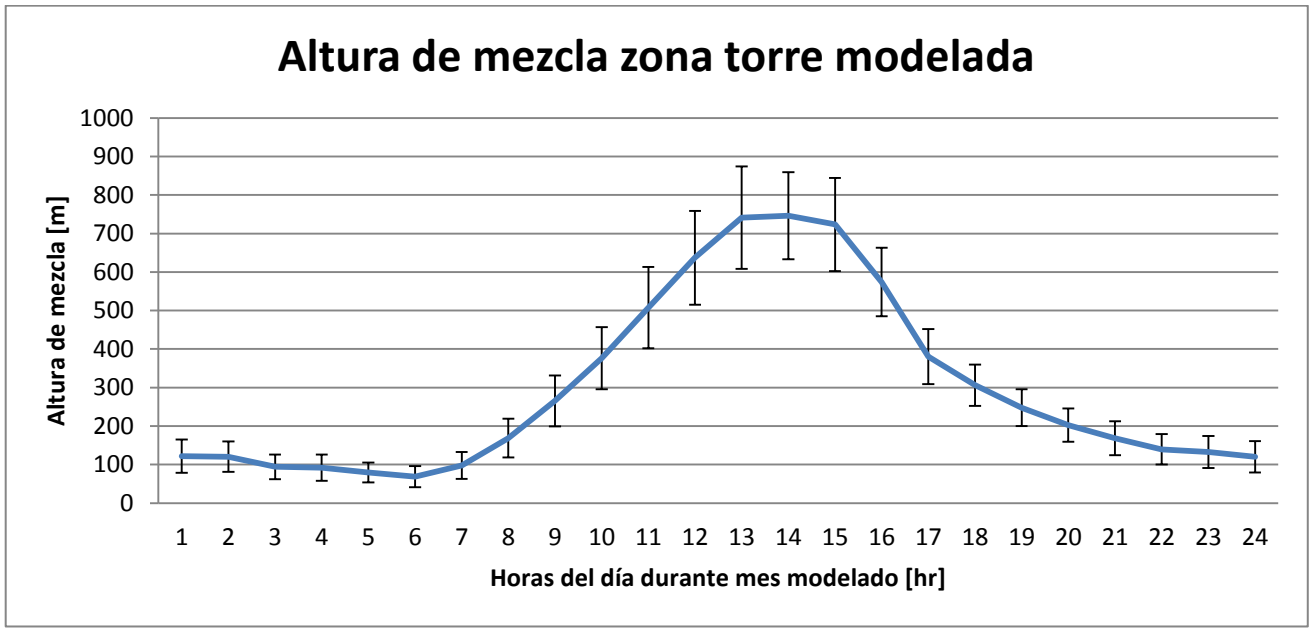
Matriz final de decisión								
	Historial MP10	Historial MP2.5	Población menor a 4 años	Población mayor a 60 años	Densidad poblacional	TMC	TMA	Vector prioridad de las alternativas
Puente alto	0,029	0,046	0,100	0,096	0,098	0,095	0,097	0,0656
El Bosque	0,270	0,194	0,068	0,085	0,166	0,097	0,096	0,1090
La Florida	0,244	0,151	0,253	0,292	0,091	0,074	0,058	0,1166
Parque O'Higgins	0,130	0,163	0,100	0,096	0,098	0,095	0,097	0,0864
Pudahuel	0,138	0,151	0,121	0,085	0,038	0,053	0,150	0,0677
Cerro Navia	0,080	0,163	0,059	0,062	0,177	0,125	0,114	0,0940
Independencia	0,056	0,052	0,049	0,044	0,231	0,289	0,282	0,1418
Las Condes	0,017	0,036	0,141	0,187	0,056	0,118	0,041	0,0760
Quilicura	0,036	0,044	0,108	0,053	0,045	0,053	0,066	0,0418
Vector ponderación	0,106	0,088	0,047	0,106	0,107	0,318	0,027	

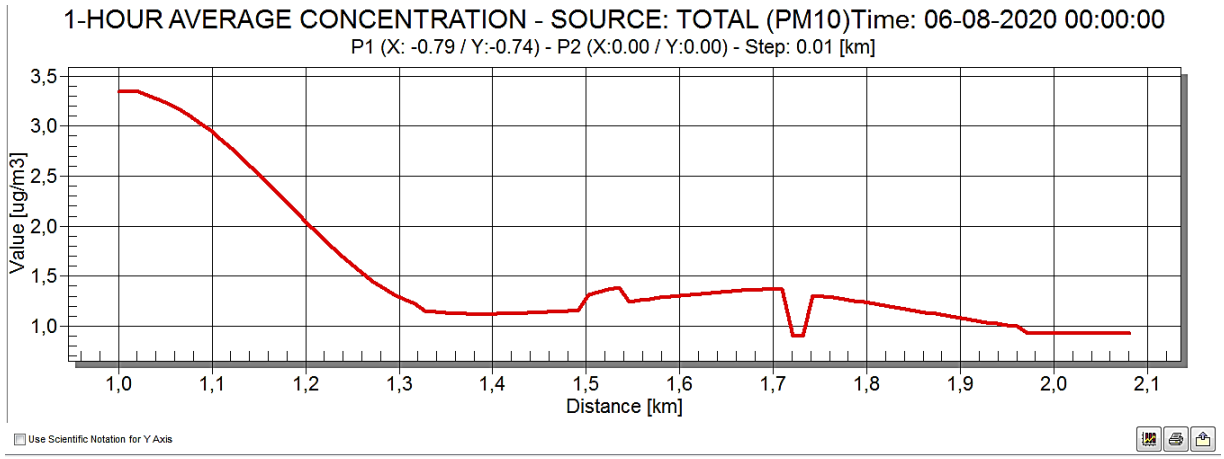
Anexo H

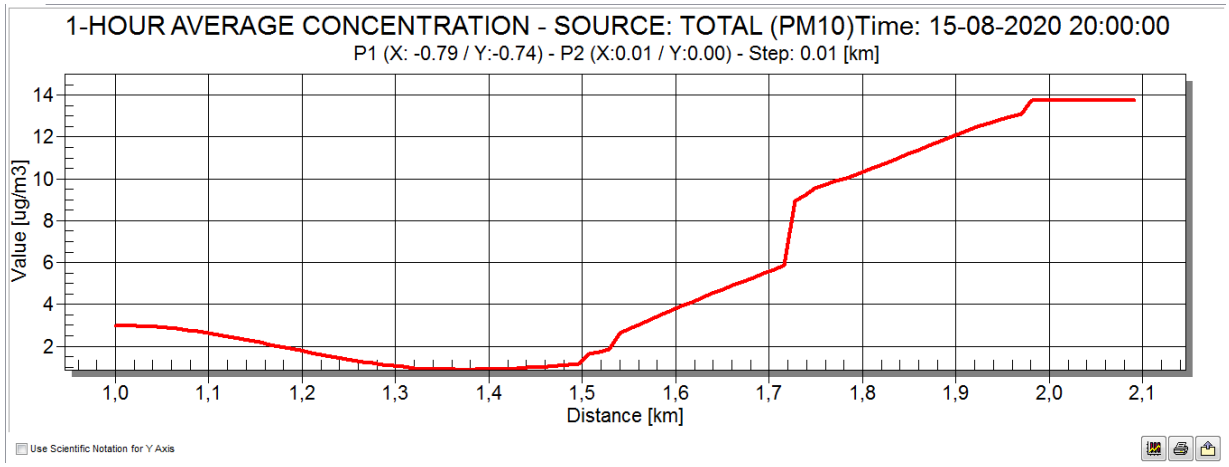
Gráficas de altura de mezcla, temperatura de la zona,velocidad del viento modelada y perfiles de MP entre zona de torre y zona de estación modelada.

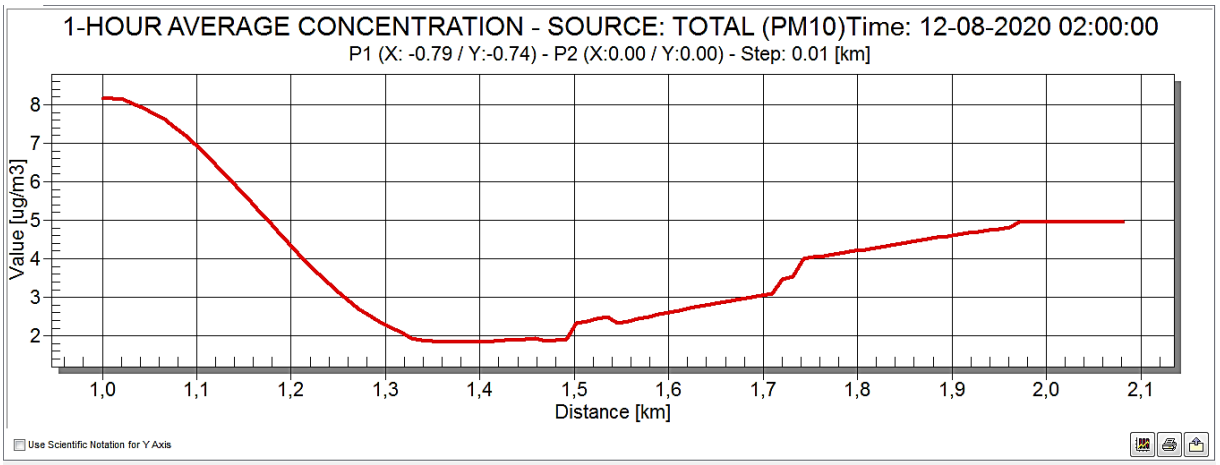

Temperatura zona torre modelada
Temperatura [C°]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
Horas del día durante mes modelado [hr]

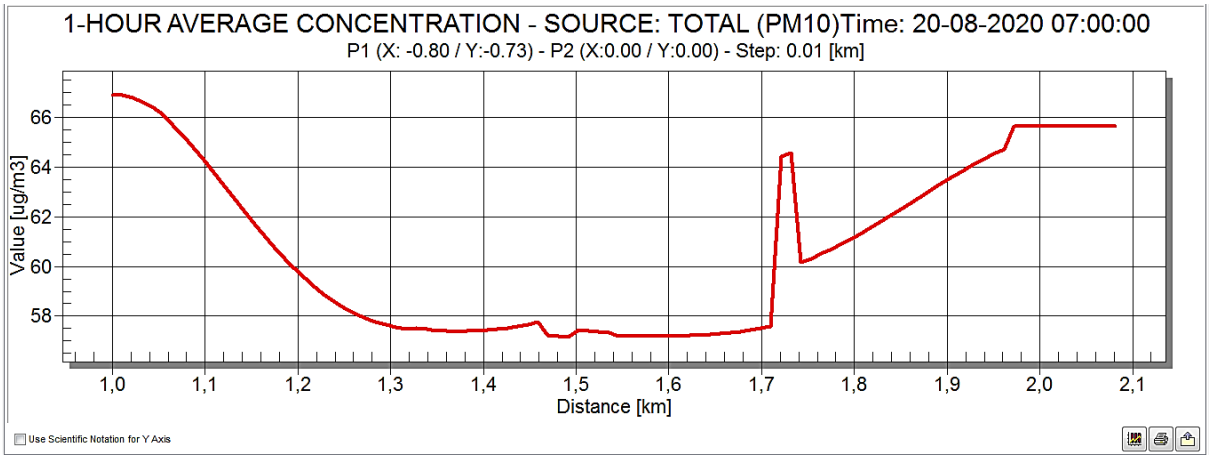

Velocidad de viento zona torre modelada
Velocidad de viento m/s
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
Horas del dia durante mes modelado [hr]

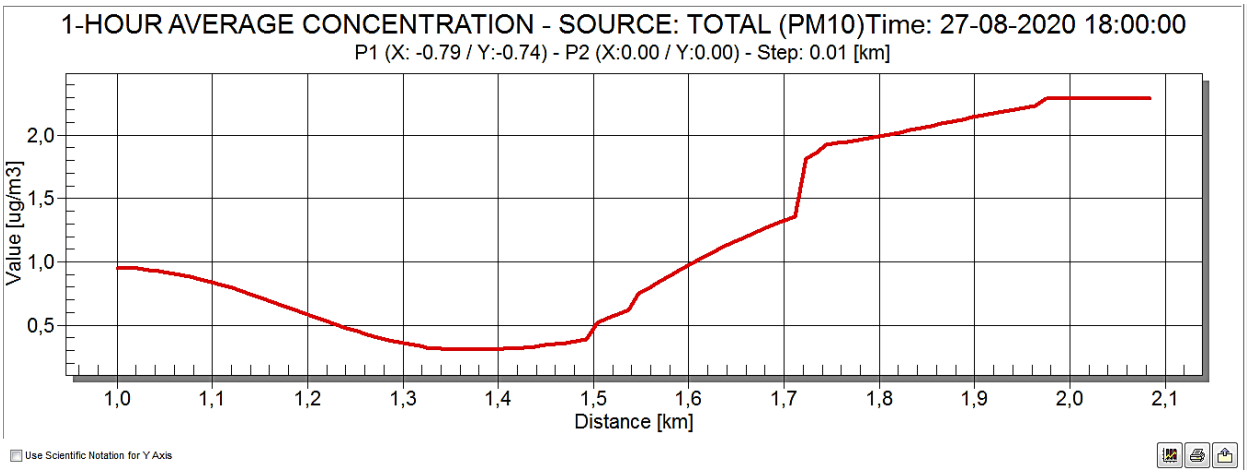

Altura de mezcla zona torre modelada
Altura de mezcla [m]
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
Horas del día durante mes modelado [hr]

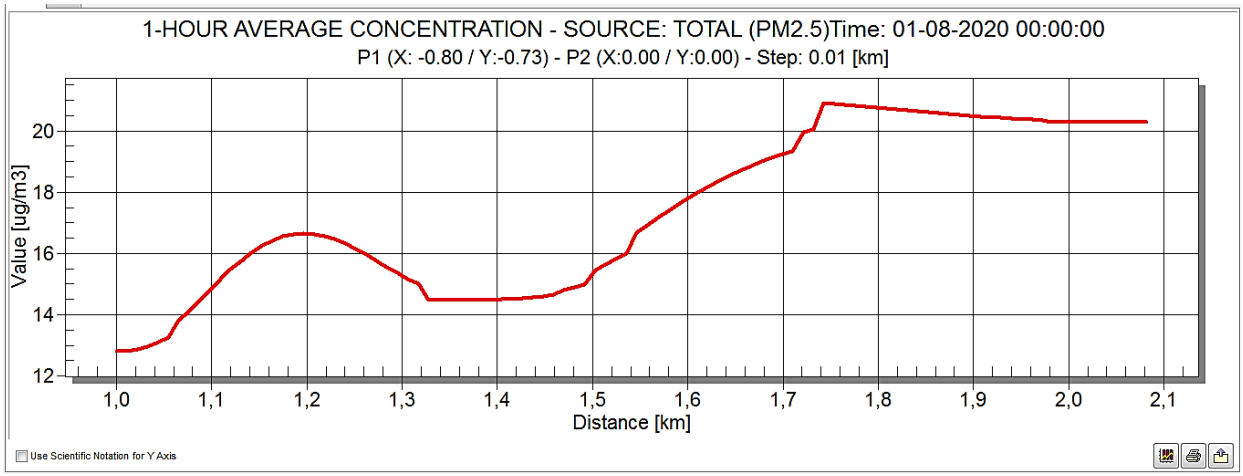

1-HOUR AVERAGE CONCENTRATION - SOURCE: TOTAL (PM10)Time: 06-08-2020 00:00:00
P1 (X: -0.79 / Y:-0.74) - P2 (X:0.00 / Y:0.00) - Step: 0.01 [km]
Value [ug/m3]
3,5
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
1,0 1,1 1,2 1,3 1,4 1,5 1,6 1,7 1,8 1,9 2,0 2,1
Distance [km]
Use Scientific Notation for Y Axis

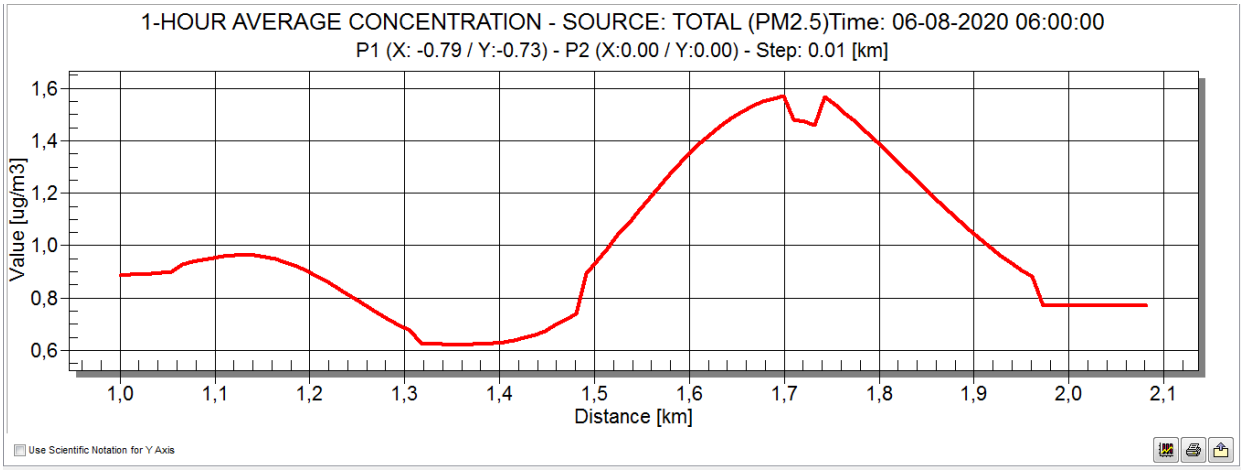

1-HOUR AVERAGE CONCENTRATION - SOURCE: TOTAL (PM10)Time: 15-08-2020 20:00:00
P1 (X: -0.79 / Y:-0.74) - P2 (X:0.01 / Y:0.00) - Step: 0.01 [km]
Value [ug/m3]
14
12
10
8
6
4
2
1,0 1,1 1,2 1,3 1,4 1,5 1,6 1,7 1,8 1,9 2,0 2,1
Distance [km]
Use Scientific Notation for Y Axis

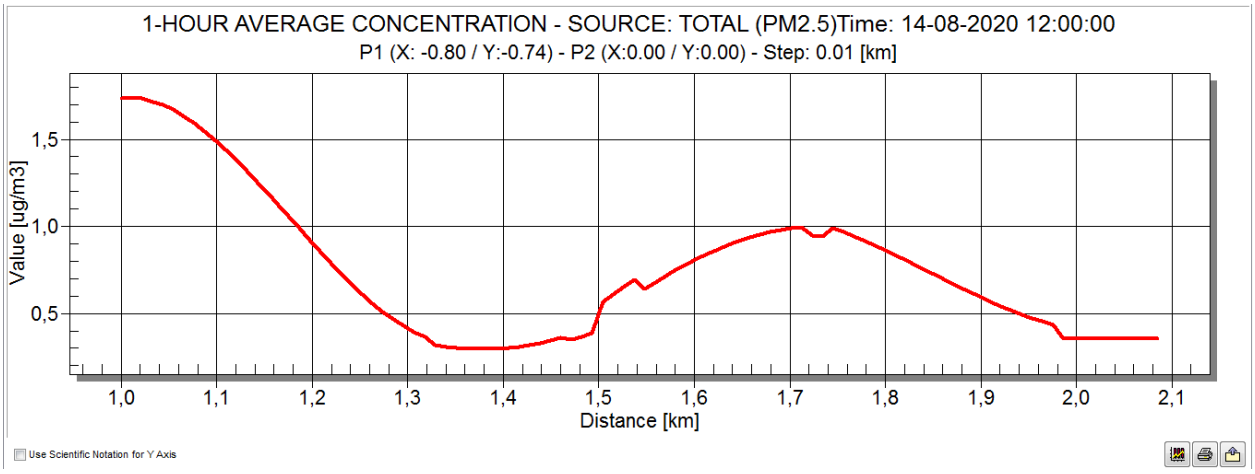

1-HOUR AVERAGE CONCENTRATION - SOURCE: TOTAL (PM10)Time: 12-08-2020 02:00:00
P1 (X: -0.79 / Y:-0.74) - P2 (X:0.00 / Y:0.00) - Step: 0.01 [km]
Value [ug/m3]
8
7
6
5
4
3
2
1,0
1,1
1,2
1,3
1,4
1,5
1,6
1,7
1,8
1,9
2,0
2,1
Distance [km]
Use Scientific Notation for Y Axis

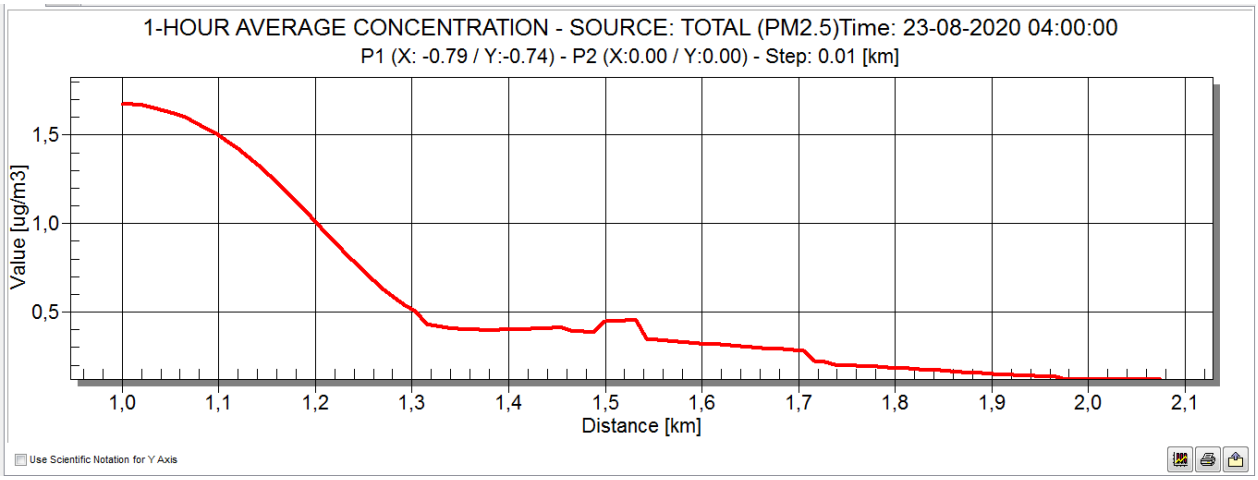

1-HOUR AVERAGE CONCENTRATION - SOURCE: TOTAL (PM10)Time: 20-08-2020 07:00:00
P1 (X: -0.80 / Y:-0.73) - P2 (X:0.00 / Y:0.00) - Step: 0.01 [km]
Value [ug/m3]
66
64
62
60
58
1,0
1,1
1,2
1,3
1,4
1,5
1,6
1,7
1,8
1,9
2,0
2,1
Distance [km]
Use Scientific Notation for Y Axis

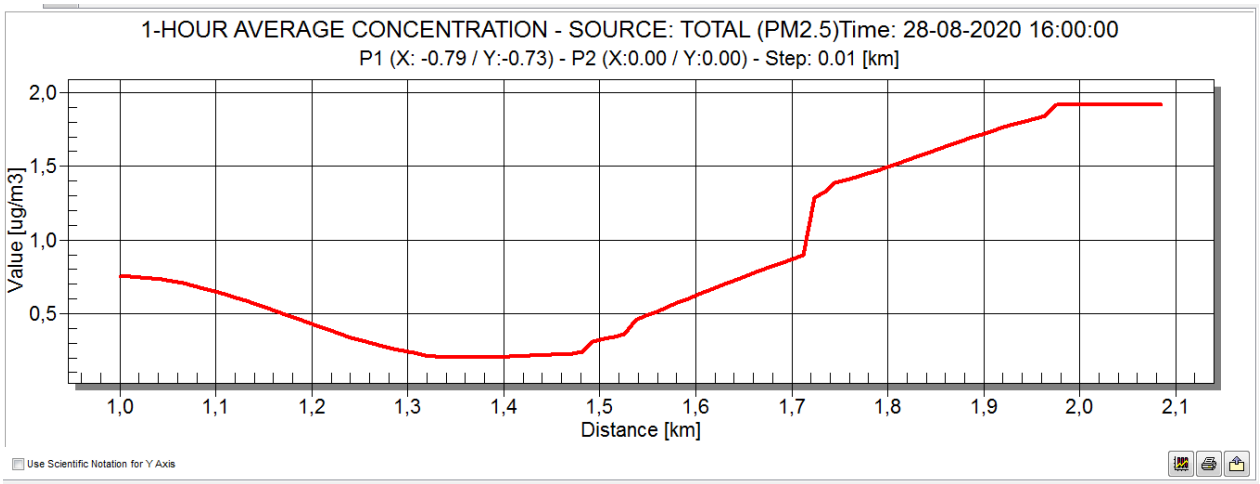

1-HOUR AVERAGE CONCENTRATION - SOURCE: TOTAL (PM10)Time: 27-08-2020 18:00:00
P1 (X: -0.79 / Y:-0.74) - P2 (X:0.00 / Y:0.00) - Step: 0.01 [km]
Value [ug/m3]
2,0
1,5
1,0
0,5
1,0
1,1
1,2
1,3
1,4
1,5
1,6
1,7
1,8
1,9
2,0
2,1
Distance [km]
Use Scientific Notation for Y Axis


1-HOUR AVERAGE CONCENTRATION - SOURCE: TOTAL (PM2.5)Time: 01-08-2020 00:00:00
P1 (X: -0.80 / Y:-0.73) - P2 (X:0.00 / Y:0.00) - Step: 0.01 [km]
Value [ug/m3]
20
18
16
14
12
1,0
1,1
1,2
1,3
1,4
1,5
1,6
1,7
1,8
1,9
2,0
2,1
Distance [km]
Use Scientific Notation for Y Axis


1-HOUR AVERAGE CONCENTRATION - SOURCE: TOTAL (PM2.5)Time: 06-08-2020 06:00:00
P1 (X: -0.79 / Y:-0.73) - P2 (X:0.00 / Y:0.00) - Step: 0.01 [km]
Value [ug/m3]
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
1,0
1,1
1,2
1,3
1,4
1,5
1,6
1,7
1,8
1,9
2,0
2,1
Distance [km]
Use Scientific Notation for Y Axis


1-HOUR AVERAGE CONCENTRATION - SOURCE: TOTAL (PM2.5)Time: 14-08-2020 12:00:00
P1 (X: -0.80 / Y:-0.74) - P2 (X:0.00 / Y:0.00) - Step: 0.01 [km]
Value [ug/m3]
1,5
1,0
0,5
1,0
1,1
1,2
1,3
1,4
1,5
1,6
1,7
1,8
1,9
2,0
2,1
Distance [km]
Use Scientific Notation for Y Axis

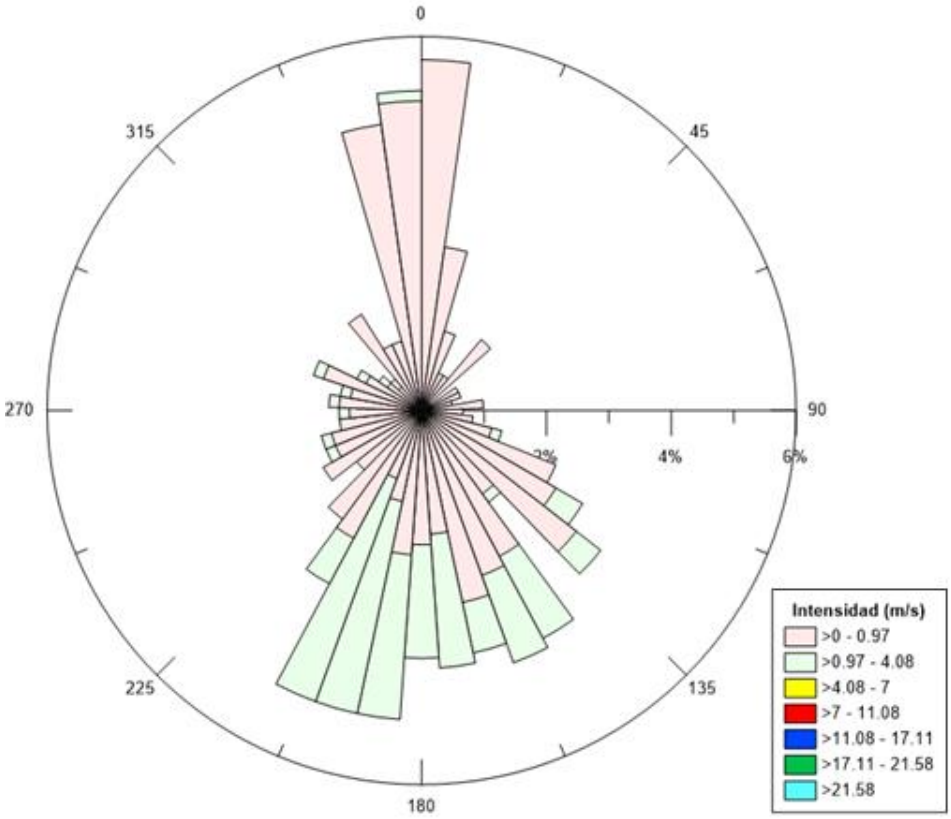

1-HOUR AVERAGE CONCENTRATION - SOURCE: TOTAL (PM2.5)Time: 23-08-2020 04:00:00
P1 (X: -0.79 / Y:-0.74) - P2 (X:0.00 / Y:0.00) - Step: 0.01 [km]
Value [ug/m3]
1,5
1,0
0,5
1,0 1,1 1,2 1,3 1,4 1,5 1,6 1,7 1,8 1,9 2,0 2,1
Distance [km]
Use Scientific Notation for Y Axis


1-HOUR AVERAGE CONCENTRATION - SOURCE: TOTAL (PM2.5)Time: 28-08-2020 16:00:00
P1 (X: -0.79 / Y:-0.73) - P2 (X:0.00 / Y:0.00) - Step: 0.01 [km]
Value [ug/m3]
2,0
1,5
1,0
0,5
1,0 1,1 1,2 1,3 1,4 1,5 1,6 1,7 1,8 1,9 2,0 2,1
Distance [km]
Use Scientific Notation for Y Axis

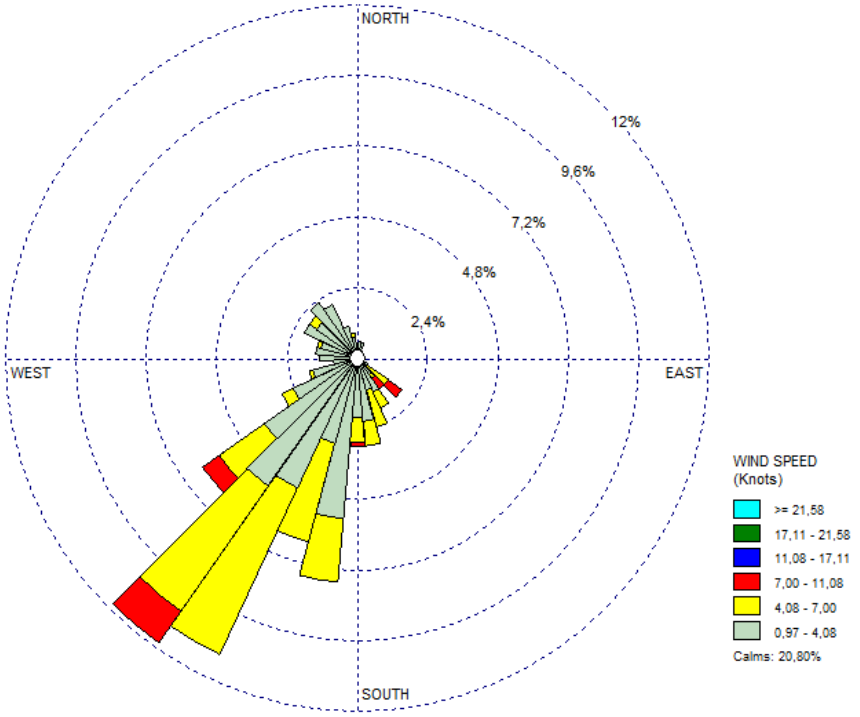
Anexo I

Rosas de los vientos obtenidas mediante RED-MACAM y mediante modelación WRF-CALPUFF.

Rosa obtenida de información de RED-MACAM



Rosa obtenida de información de modelación WRF-CALPUFF®



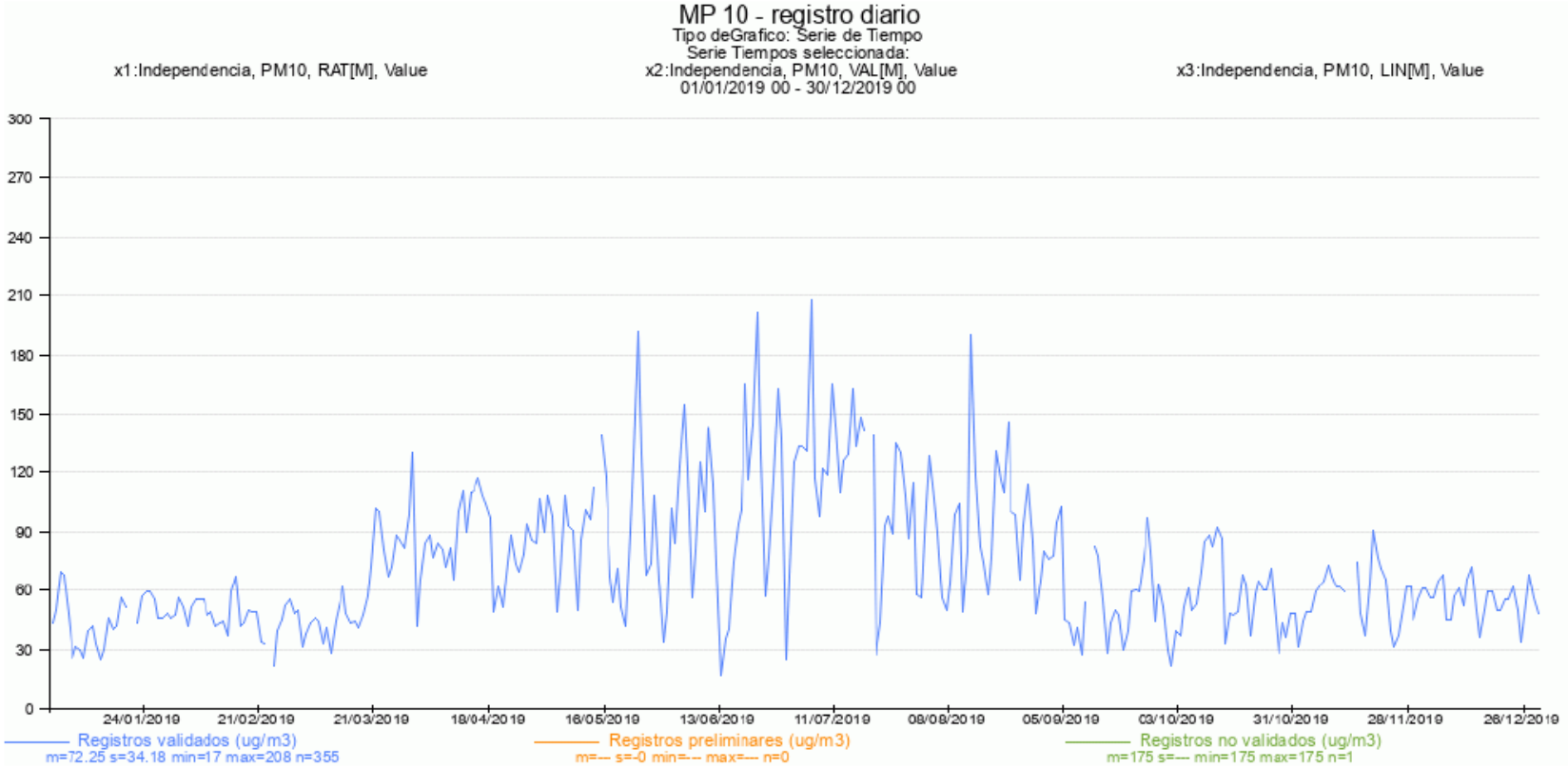
Anexo J

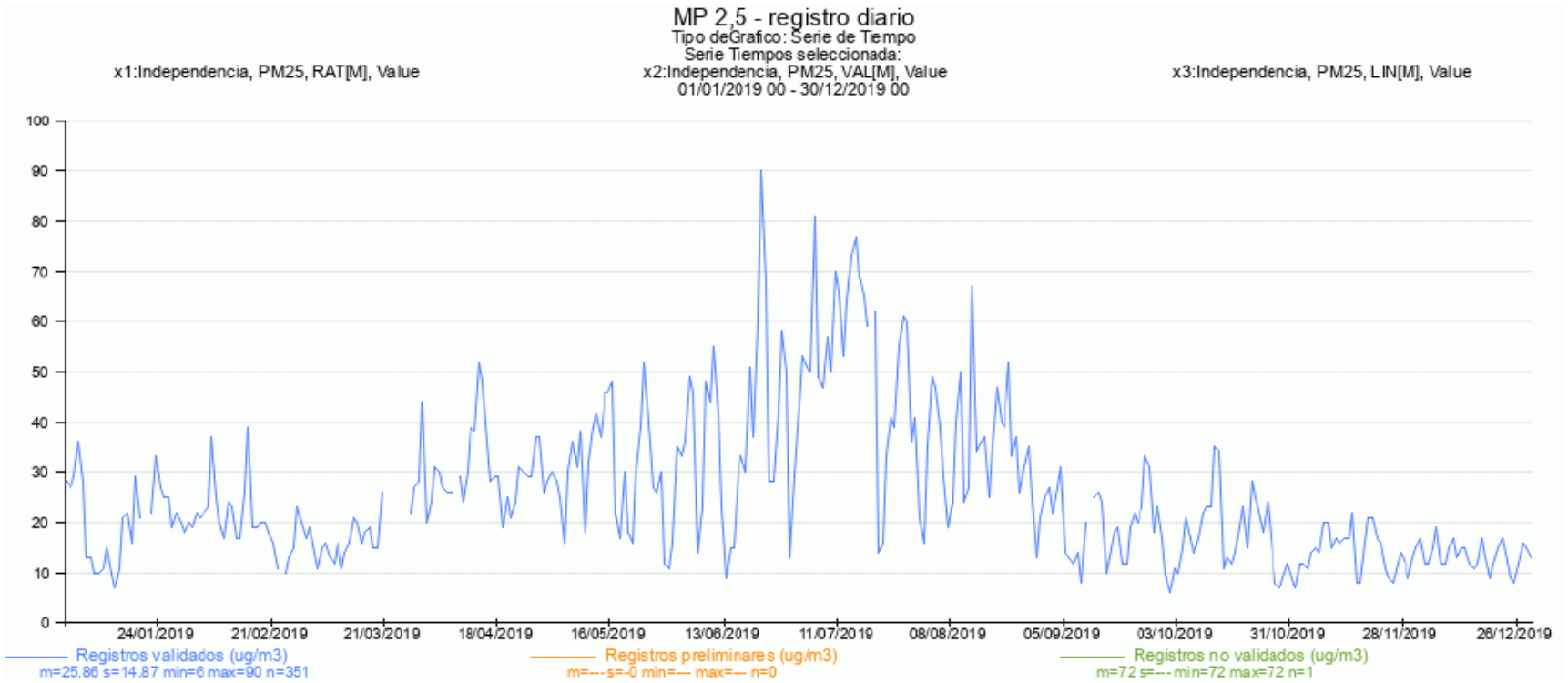
Tabla de parámetros para el cálculo monetario de las FDR para cada affección.

Efecto	Causa	Grupo Edad	CM	PP	Disutilidad (WTP)	Total
Mortalidad Prematura	CPM	Adultos			7.583	7.583
		Adultos Mayores			7.583	7.583
Admisiones Hospitalarias (HA)	CHF	Adultos Mayores	27,4	4,2		31,6
	DYS	Adultos Mayores	43,9	4,1		48,1
	IHD	Adultos Mayores	20,9	3,5		24,4
	CLD	Adultos	27,4	3,6		31,0
		Adultos Mayores	27,4	4,2		31,6
	PNEU	Adultos Mayores	29,4	4,8		34,2
	CVD	Adultos	45,3	3,6		48,9
		Adultos Mayores	43,9	4,8		48,7
	ASTH	Niños	21,0	1,1		22,1
		Adultos	21,0	3,1		24,1
	RSP	Adultos Mayores	29,4	4,7		34,1
Visitas Salas Emergencia (ERV)	ASTH	Niños	0,8	0,3		1,1
		Adultos	0,8	0,3		1,1
		Adultos Mayores	0,8	0,3		1,1
Días de Colegio Perdidos (SLD)		Niños		0,2		0,2
Días Laborales Perdidos (WLD)		Adultos		0,7		0,7
Días con Actividad Restringida (RAD)		Adultos		0,2		0,2
Días con Act, Rest, Leve (MRAD)		Adultos		0,0		0,0

Anexo K

Tablas de niveles de MP10 y MP2.5 a lo largo del año 2019 para la comuna de Independencia.


MP 10 - registro diario
Tipo deGrafico: Serie de Tiempo
Serie Tiempos seleccionada:
01/01/2019 00 - 30/12/2019 00
x1:Independencia, PM10, RAT[M], Value
x2:Independencia, PM10, VAL[M], Value
x3:Independencia, PM10, LIN[M], Value
300
270
240
210
180
150
120
90
60
30
0
24/01/2019
21/02/2019
21/03/2019
18/04/2019
16/05/2019
13/06/2019
11/07/2019
08/08/2019
05/09/2019
03/10/2019
31/10/2019
28/11/2019
26/12/2019
Registros validados (ug/m3)
m=72.25 s=34.18 min=17 max=208 n=355
Registros preliminares (ug/m3)
m=--- s=-0 min=-- max=--- n=0
Registros no validados (ug/m3)
m=175 s=--- min=175 max=175 n=1


MP 2,5 - registro diario
Tipo deGrafico: Serie de Tiempo
Serie Tiempos seleccionada:
x1:Independencia, PM25, RAT[M], Value
x2:Independencia, PM25, VAL[M], Value
x3:Independencia, PM25, LIN[M], Value
01/01/2019 00 - 30/12/2019 00
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
24/01/2019
21/02/2019
21/03/2019
18/04/2019
16/05/2019
13/06/2019
11/07/2019
08/08/2019
05/09/2019
03/10/2019
31/10/2019
28/11/2019
26/12/2019
Registros validados (ug/m3)
m=25.86 s=14.87 min=6 max=90 n=351
Registros preliminares (ug/m3)
m=--- s=-0 min=--- max=--- n=0
Registros no validados (ug/m3)
m=72 s=--- min=72 max=72 n=1

Anexo L

Cálculo para captura aproximada de MP mensual y anual.

Cálculo aproximado de material particulado neto capturado a lo largo del año por la SFT:

$$FA \cdot \Delta\text{CAP} \cdot HF \ = MPT$$

Dónde:

FA: $Flujo\ de\ aire\ tratado\ \left[\frac{m^3}{h}\right]$

ΔCAP: $\Delta Concentración\ MPcapturado\ [\frac{\mu g}{m^3}]$

HF: $horas\ de\ funcionamiento\ hábiles\ al\ año\ [\frac{h}{año}]$

MPT: $MP\ total\ capturado\ [\frac{ug}{año}]$

Análogamente para el material particulado neto mensual:

$$FA \cdot \Delta\text{CAP} \cdot HF \ = MPT$$

Dónde:

FA: $Flujo\ de\ aire\ tratado\ \left[\frac{m^3}{h}\right]$

ΔCAP: $\Delta Concentración\ MPcapturado\ [\frac{\mu g}{m^3}]$

HF: $horas\ de\ funcionamiento\ hábiles\ al\ mes\ [\frac{h}{mes}]$

MPT: $MP\ total\ capturado\ [\frac{ug}{mes}]$