

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIA**

**Departamento de Física**



**Variabilidad espacial de elementos traza determinados en el material particulado en Santiago, Concepción y Puchuncaví**

**Francisca Rojas Martínez**

**Profesor Guía: Dr. Felipe Reyes  
Reyes**

**Tesis para optar al Título Profesional  
de Ingeniera Física.**

**Santiago - Chile**

**2018**



# **Variabilidad espacial de elementos traza determinados en el material particulado en Santiago, Concepción y Puchuncaví**

**Francisca Rojas Martínez**

Este trabajo de titulación fue elaborado bajo la tutela y guía del Dr. Felipe Reyes, líder del área de Calidad de Aire del Centro Mario Molina Chile con el patrocinio del Dr. Ernesto Gramsch del Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile y ha sido aprobado por la siguiente comisión calificadora.

Dr. Raúl Cordero

\_\_\_\_\_

Dr. Ernesto Gramsch

\_\_\_\_\_

Dr. Patricio Pérez

\_\_\_\_\_

Dra. Yolanda Vargas

\_\_\_\_\_

---

Dr. Daniel Serafini  
Jefe de Carrera

## Resumen

El objetivo del presente estudio ha sido analizar la variabilidad espacial de concentración por  $MP_{10}$ ,  $MP_{2.5}$  y sus especies, estas últimas utilizadas como trazadores de fuentes con sustentación en estudios previos encontrados en la literatura. Para alcanzar este objetivo se monitoreó con equipos de muestreo discreto de material particulado durante temporadas invernales y estivales de los años 2016 y 2017 en la Región Metropolitana, Región de Valparaíso y Región del Biobío, con énfasis en las principales zonas con conocidos problemas de contaminación ambiental. Las herramientas matemáticas para determinar la variabilidad espacial de los trazadores fueron el modelo de regresión multivariada, donde se incluyeron parámetros meteorológicos y otras variables explicativas, y el modelo receptor EPA PMF con el fin de identificar y estimar perfiles de contribución de fuentes del  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$ .

El estudio arrojó que parámetros meteorológicos como precipitaciones, magnitud de viento y temperatura tienen un impacto significativo en el material particulado. Para precipitaciones mayores a 1 [mm] y a magnitudes de viento mayores a 1.6[mm] la concentración de MP puede disminuir un 23%, por lo que se consideran como agentes efectivos de limpieza.

Con respecto a las fuentes, se encontró que los niveles de  $MP_{2.5}$  en Concepción son los más altos de las tres regiones monitoreadas, seguidos de la RM y finalmente la Quinta Región.

La principal fuente que aporta a la RM es la quema de biomasa mezclada con emisiones vehiculares, y el polvo en resuspensión. Para la Quinta Región se observa como principal aporte a la quema de biomasa y las emisiones industriales y finalmente para la Octava Región se encontró el principal aporte de Quema de Biomasa mezclado con emisiones vehiculares, seguido del sector industrial.

Se encontró que la quema de biomasa es una fuente que se aísla en las tres regiones, y alcanza aportes significativos variando entre un 11% en la Quinta Región hasta un 77% en la Región del Biobío.

*Dedico esta tesis a mis cuatro madres, Lucía, Mónica, Cecilia y Moncy, sin ellas no hubiera llegado a esta instancia.*

## **Agradecimientos**

Culminar este proceso ha sido la cumbre más dura que me ha tocado alcanzar, es por esto que agradezco al Centro Mario Molina Chile por permitirme desarrollar este trabajo de título, a Felipe por su paciencia y guía, al profesor y Director Pedro Oyola por creer en mi, al profesor Ernesto Gramsch por sus consejos y excelente disposición y a todos los que conocí como parte del Centro Mario Molina Chile, especialmente quienes me ayudaron desde mi primer intento de tesis que, por cierto, resultó tocar tangencialmente este trabajo final. Agradezco a mis amigas, familia y compañera por sus palabras de aliento en los días mas oscuros.

# Tabla de Contenidos

	Página
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1 Antecedentes</b>	<b>2</b>
1.1 Puchuncaví - Quintero - Concón . . . . .	2
1.2 Santiago . . . . .	5
1.3 Concepción . . . . .	7
<b>2 Metodología</b>	<b>11</b>
2.1 Equipos utilizados . . . . .	11
2.1.1 Harvard Impactor . . . . .	11
2.1.2 Kleinfiltergerät . . . . .	13
2.2 Campañas de monitoreo . . . . .	14
2.2.1 Campaña de monitoreo Santiago . . . . .	15
2.2.2 Campaña de monitoreo Puchuncaví . . . . .	19
2.2.3 Campaña de monitoreo en Concepción . . . . .	23
2.3 Regresión lineal multivariada . . . . .	29
2.4 Positive matrix factorization PMF . . . . .	31
<b>3 Resultados y Análisis</b>	<b>34</b>
3.1 Variación temporal y espacial del $MP_{10}$ sus elementos . . . . .	34
3.1.1 Efecto Sitio sobre el $MP_{2.5}$ y sus especies . . . . .	39
3.1.2 Efecto Temporada en el $MP_{10}$ . . . . .	43
3.1.3 Evaluación del efecto meteorológico para el $MP_{10}$ . . . . .	43
3.2 Variación temporal y espacial del $MP_{2.5}$ sus especies . . . . .	48
3.2.1 Efecto Sitio del $MP_{2.5}$ y sus especies . . . . .	53
3.2.2 Efecto Temporada . . . . .	56
3.2.3 Efecto Meteorológico . . . . .	57
3.3 Identificación de fuentes . . . . .	61

3.3.1	Región Metropolitana - MP <sub>10</sub> . . . . .	61
3.3.2	Región Metropolitana - MP <sub>2.5</sub> . . . . .	67
3.3.3	Puchuncaví - Quintero - Concón - MP <sub>2.5</sub> . . . . .	71
3.3.4	MP <sub>10</sub> en Concepción . . . . .	75
3.3.5	MP <sub>2.5</sub> en Concepción . . . . .	80
3.3.6	Análisis comparativo de fuentes emisoras por estación . . . . .	85
	<b>Conclusiones</b>	<b>90</b>
	<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>93</b>
	<b>Anexos</b>	<b>96</b>
3.4	Series de tiempo para los factores de los sitios de monitoreo . . . . .	96



# Índice de Tablas

2.1	Descripción de sitios, duración y mediciones de las campañas de monitoreo . . . . .	15
2.2	Tabla de filtros muestreados en Santiago detallados por corte y sitio . . . . .	18
2.3	Tabla de filtros muestreados en cordón industrial Concón-Puchuncaví detallados por corte y sitio . . . . .	23
2.4	Tabla de filtros muestreados en Concepción detallados por corte y sitio . . . . .	29
3.1	Concentraciones de MP <sub>10</sub> en $\mu g/m^3$ y elementos en $ng/m^3$ para temporadas invernales (campañas realizadas en los meses de mayo a agosto) y estivales (campañas realizadas en los meses de septiembre a abril). . . . .	36
3.2	Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estándar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis de la variable Temporada para elementos del MP <sub>10</sub> , los valores destacados indican resultados estadísticamente significativos . . . . .	43
3.3	Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estándar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis para la variable Humedad Relativa de elementos del MP <sub>10</sub> , los valores destacados indican resultados estadísticamente significativos . . . . .	44
3.4	Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estándar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis para la variable Temperatura de elementos del MP <sub>10</sub> , los valores destacados indican resultados estadísticamente significativos . . . . .	45
3.5	Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estándar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis para la variable rapidez del viento para los elementos del MP <sub>10</sub> , los valores destacados indican resultados estadísticamente significativos . . . . .	46
3.6	Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estándar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis de la variable Precipitaciones para los elementos del MP <sub>10</sub> , los valores destacados indican resultados estadísticamente significativos . . . . .	47
3.7	Efectos sobre las especies significativamente estadísticos . . . . .	48
3.8	tabla especies MP <sub>2.5</sub> . . . . .	50

3.9	Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estándar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis para la variable Temporada de elementos del MP <sub>2.5</sub> , los valores destacados indican resultados estadísticamente significativos . . . . .	57
3.10	Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estándar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis para la variable Humedad Relativa de elementos del MP <sub>2.5</sub> , los valores destacados indican resultados estadísticamente significativos . .	58
3.11	Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estándar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis para la variable Humedad Relativa de elementos del MP <sub>2.5</sub> . . . . .	58
3.12	Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estándar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis para la variable Magnitud del viento para los elementos del MP <sub>2.5</sub> , los valores destacados indican resultados estadísticamente significativos . .	59
3.13	Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estándar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis de la variable Precipitaciones para los elementos del MP <sub>2.5</sub> , los valores destacados indican resultados estadísticamente significativos . .	60
3.14	Efectos sobre las especies significativamente estadísticos . . . . .	61
3.15	Principales factores encontrados en los sitios de la RM para MP <sub>10</sub> y MP <sub>2.5</sub> . . . . .	86
3.16	Principales factores encontrados en los sitios de la Quinta Región para el MP <sub>2.5</sub> . .	87
3.17	Principales factores encontrados en la Región del Biobío para el MP <sub>10</sub> y MP <sub>2.5</sub> . . .	89

# Índice de Ilustraciones

1.1	Mapa donde se presentan las zonas urbanas e industriales de Quintero-Puchuncaví. Fuente: elaboración propia a partir de Google Earth . . . . .	3
1.2	Mapa donde se presentan las zonas urbanas e industriales de Concón. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth . . . . .	5
1.3	Imagen donde se observa el estancamiento de la capa de inversión térmica. Fuente: Elaboración Propia . . . . .	6
1.4	Mapa donde se presentan las zonas urbanas e industriales de Coronel. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth . . . . .	8
1.5	Mapa donde se presentan las zonas urbanas e industriales de Talcahuano. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth . . . . .	9
2.1	Diagrama de la geometría del impactador. Fuente: Impactor Design. Atmospheric Environment. Vol 10. 891-896 . . . . .	12
2.2	Cabezales del HI separados por partes, se observa que en medio de este se ubica el filtro colector de color blanco. Fuente: CMMCH . . . . .	13
2.3	Imagen del KFG fuente: Manual de Usuario . . . . .	14
2.4	Mapa donde se identifican los sitios de monitoreo pertenecientes a la región Metropolitana. Fuente: Elaboración Propia a partir de Google Earth . . . . .	16
2.5	Equipo HI en el techo de la estación Las Condes . . . . .	17
2.6	Equipo HI en el techo de la estación Pudahuel . . . . .	18
2.7	Mapa donde se identifican los sitios de monitoreo pertenecientes a la Quinta Región. Fuente: Elaboración Propia a partir de Google Earth . . . . .	19
2.8	Fotografía de la entrada del cuartel de bomberos donde se instaló el KFG. . . . .	20
2.9	Fotografía del equipo KFG instalado en el patio de la compañía de bomberos. . . . .	20
2.10	Fotografía de la entrada del de la estación transmisora de la Armada de Chile, Quintero. . . . .	21
2.11	Fotografía de la instalación del equipo KFG en el techo de la estación de antenas. . . . .	21
2.12	Fotografía de la entrada a la estación de monitoreo Ventanas . . . . .	22
2.13	Vista del complejo industrial Ventanas desde la estación de monitoreo . . . . .	22

2.14	Mapa donde se identifican los sitios de monitoreo pertenecientes a la región del Biobío. Fuente: elaboración propia a partir de Google Earth . . . . .	23
2.15	Estación de monitoreo Kingston College donde se instaló el equipo discreto de material particulado . . . . .	24
2.16	Vista del equipo KFG desde el interior del colegio Kingston College . . . . .	24
2.17	Estación de monitoreo UDT donde se instaló el equipo discreto de material particulado	25
2.18	Vista del equipo KFG, instalado en el techo del laboratorio de UDT . . . . .	25
2.19	Estación de monitoreo Hualqui donde se instaló el equipo discreto de material particulado . . . . .	26
2.20	Vista del equipo KFG sobre el techo de la estación Hualqui . . . . .	27
2.21	Vista estación de monitoreo Consultorio, Talcahuano . . . . .	28
2.22	Vista del equipo HI sobre la estación de monitoreo Consultorio, Talcahuano . . . . .	28
2.23	Representación del método ME-2, usado para encontrar el Q mínimo. Fuente: Manual de Usuario PMF . . . . .	32
3.1	Distribución espacial diaria durante ambas temporadas para el MP <sub>10</sub> , incluyendo la norma máxima en la línea punteada . . . . .	35
3.2	Distribución espacial de la masa del MP <sub>10</sub> . . . . .	39
3.3	Comportamiento de especies del MP <sub>10</sub> relacionadas a la corteza terrestre en los sitios de monitoreo . . . . .	40
3.4	Comportamiento de especies relacionadas a las emisiones vehiculares en los sitios de monitoreo . . . . .	41
3.5	Comportamiento de especies relacionadas a emisiones industriales en los sitios de monitoreo . . . . .	42
3.6	Comportamiento de especies relacionadas a Aerosol marino y quema de biomasa en los sitios de monitoreo . . . . .	42
3.7	Distribución espacial diaria durante ambas temporadas para el material particulado fino, incluyendo la norma máxima en la línea punteada . . . . .	49
3.8	Distribución espacial del material particulado fino . . . . .	53
3.9	Comportamiento de especies relacionadas a las emisiones terrestres en los sitios de monitoreo . . . . .	54
3.10	Comportamiento de especies relacionadas a las emisiones vehiculares en los sitios de monitoreo . . . . .	54
3.11	Comportamiento de especies relacionadas a las emisiones industriales en los sitios de monitoreo . . . . .	55
3.12	Comportamiento de especies relacionadas a las emisiones marinas y de biomasa en los sitios de monitoreo . . . . .	56

3.13 Factores modelados para una configuración de 4 fuentes en Las Condes . . . . .	62
3.14 Factores modelados para una configuración de 4 fuentes en Pudahuel . . . . .	64
3.15 Factores modelados para una configuración de 5 fuentes en Melipilla . . . . .	65
3.16 Porcentaje de contribución de fuentes al $MP_{10}$ en los sitios de la RM . . . . .	66
3.17 Factores modelados para una configuración de 3 fuentes en Las Condes . . . . .	68
3.18 Factores modelados para una configuración de 4 fuentes en Pudahuel . . . . .	69
3.19 Factores modelados para una configuración de 4 fuentes en Melipilla . . . . .	70
3.20 Porcentaje de contribución de fuentes al $MP_{2.5}$ en los sitios de la RM . . . . .	71
3.21 Factores modelados para una configuración de 3 fuentes en Concón . . . . .	72
3.22 Factores modelados para una configuración de 4 fuentes en Quintero . . . . .	73
3.23 Factores modelados para una configuración de 5 fuentes en Ventanas . . . . .	74
3.24 Porcentaje de contribución de fuentes al $MP_{2.5}$ en los sitios de la Quinta Región . . .	75
3.25 Factores modelados para una configuración de 4 fuentes en Kingston College . . .	76
3.26 Factores modelados para una configuración de 4 fuentes en Hualqui . . . . .	77
3.27 Factores modelados para una configuración de 3 fuentes en UDT . . . . .	78
3.28 Factores modelados para una configuración de 3 fuentes en Consultorio . . . . .	79
3.29 Porcentaje de contribución de fuentes al $MP_{10}$ en los sitios de la Octava Región . .	80
3.30 Factores modelados para una configuración de 4 fuentes en KC . . . . .	81
3.31 Factores modelados para una configuración de 3 fuentes en Hualqui . . . . .	82
3.32 Factores modelados para una configuración de 3 fuentes en UDT . . . . .	83
3.33 Factores modelados para una configuración de 3 fuentes en Consultorio . . . . .	84
3.34 Porcentaje de contribución de fuentes al $MP_{2.5}$ en los sitios de la Octava Región . .	84
3.35 Promedio de Concentración, primer y tercer cuartil por factor para los sitios de la RM, a la izquierda para $MP_{10}$ y a la derecha para $MP_{2.5}$ . . . . .	85
3.36 Promedio de Concentración, primer y tercer cuartil por factor para los sitios de la Quinta Región. A la izquierda para $MP_{10}$ y a la derecha para $MP_{2.5}$ . . . . .	87
3.37 Promedio de Concentración, primer y tercer cuartil por factor para los sitios de la Octava Región. A la izquierda para $MP_{10}$ y a la derecha para $MP_{2.5}$ . . . . .	88
3.38 Serie de tiempo para una configuración de 4 factores encontrados en Las Condes - $MP_{10}$ . . . . .	96
3.39 Serie de tiempo para una configuración de 4 factores encontrados en Pudahuel - $MP_{10}$ . . . . .	97
3.40 Serie de tiempo para una configuración de 4 factores encontrados en Melipilla - $MP_{10}$	97
3.41 Serie de tiempo para 3 factores encontrados en Las Condes - $MP_{2.5}$ . . . . .	98
3.42 Serie de tiempo para 4 factores encontrados en Pudahuel - $MP_{2.5}$ . . . . .	98
3.43 Serie de tiempo para 4 factores encontrados en Melipilla - $MP_{2.5}$ . . . . .	99

3.44 Serie de tiempo para los 3 factores encontrados en Concón - MP <sub>2.5</sub> . . . . .	99
3.45 Serie de tiempo para los 4 factores encontrados en Quintero - MP <sub>2.5</sub> . . . . .	100
3.46 Serie de tiempo para los 5 factores encontrados en Ventanas- MP <sub>2.5</sub> . . . . .	100
3.47 Serie de tiempo de los 4 factores encontrados para KC - MP <sub>10</sub> . . . . .	101
3.48 Serie de tiempo de los 4 factores encontrados para Hualqui - MP <sub>10</sub> . . . . .	101
3.49 Serie de tiempo de los 4 factores encontrados para UDT - MP <sub>10</sub> . . . . .	102
3.50 Serie de tiempo de los 3 factores encontrados para Consultorio - MP <sub>10</sub> . . . . .	102
3.51 Serie de tiempo para los 4 factores encontrados en KC - MP <sub>2.5</sub> . . . . .	103
3.52 Serie de tiempo para los 3 factores encontrados en Hualqui - MP <sub>2.5</sub> . . . . .	103
3.53 Serie de tiempo para los 4 factores encontrados en UDT - MP <sub>2.5</sub> . . . . .	104
3.54 Serie de tiempo para los 3 factores encontrados en Consultorio - MP <sub>2.5</sub> . . . . .	104

# Objetivos

## Objetivo Principal

Analizar la variabilidad espacial de concentración de  $MP_{10}$  ,  $MP_{2.5}$  y trazadores de fuentes, y determinación de la contribución relativa de fuentes emisoras al material particulado fino y grueso en 10 puntos de monitoreo distribuidos en la Región Metropolitana, Región de Valparaíso y del Biobío.

## Objetivos Secundarios

- (i). Caracterizar los sitios de monitoreo en base a nomenclatura internacional (Background, Urbano, Transporte)
- (ii). Estudiar la variabilidad espacial las concentraciones de  $MP_{10}$  ,  $MP_{2.5}$  y elementos traza de los sitios de monitoreo disponibles.
- (iii). Implementar un análisis estadístico multivariado de Factor de Impacto por Concentración, con la finalidad de establecer las diferencias más importantes entre los sitios de monitoreo

# Introducción

La mayoría de las emisiones de material particulado a la atmósfera son atribuibles a fuentes naturales como polvo terrestre suspendido, océanos, volcanes, incendios forestales y/o gases naturales. Sin embargo, estas emisiones se dispersan uniformemente en la atmósfera resultando en una concentración background contenida en la troposfera y es relativamente baja.

Las fuentes que tienen el mayor impacto en el material particulado urbano son de fuentes antropogénicas, es decir, hechas por el hombre, y son una mezcla compleja puesto que se emiten tanto partículas como gases precursores de partículas secundarias. Estas emisiones antropogénicas son emitidas en pequeñas ciudades y áreas industriales, resultando en una grilla mundial de múltiples pequeños puntos con altas concentraciones de material particulado y otros contaminantes. Estos múltiples focos de contaminación afectan la concentración background y pueden permanecer en suspensión varios días e incluso transportarse miles de kilómetros en la atmósfera. Este aumento en los niveles de concentración tienen impacto en la salud de la población. En los últimos 20 años los problemas causados por contaminación atmosférica ha recibido gran atención y se trata como una temática de salud pública mundial, ya que varios estudios han relacionado las grandes concentraciones de MP al incremento en enfermedades respiratorias (Gent et al., 2009) (Lall, Ito, & Thurston, 2011) y mortalidad de la población (Dockery, Pope, Xu, & J, 1993) (Pope et al., 1995). Por propósitos de gestión de la exposición a la contaminación ambiental es crucial la identificación de las fuentes de material particulado responsable de los efectos de salud en la población. Un fundamentado conocimiento de las fuentes de material particulado podrán permitir una gestión de políticas ambientales más eficientes. Para esto se aplicarán métodos de distribución de fuentes basados en el balance químico del material particulado, su composición química, y datos meteorológicos. Estos estudios permiten la estimación de impactos promedio de fuentes en la calidad del aire local, y esta a su vez se puede relacionar con la actividad diaria de la ciudad mediante las especies trazadoras de fuentes.

Este estudio servirá como aporte en conocimiento y documentación para que la autoridad ambiental tome estrategias en políticas públicas, establecimiento de pautas de acción y estándares de calidad del aire.



# Capítulo 1

## Antecedentes

Estudios científicos evidencian que diferentes periodos de exposición al material particulado están asociados a mortalidad por causas respiratorias y cardiovasculares (Brook, Rajagopalan, Pope, Brook, & Bhatnagar, 2010). La población más susceptible de efectos adversos son los niños y ancianos. Estudios recientes también sugieren que también tienen efectos sobre el desarrollo neurológico de los niños y desordenes neurológicos en los adultos (Raaschou-Nielsen, Anderser, Beelen, Samoli, & Stafoggia, 2016).

La RM, V y VIII Región representan el 60% <sup>1</sup> de la población nacional, y sus principales ciudades presentan reconocidos problemas de contaminación atmosférica: las tres han sido declaradas saturadas por MP2.5 en su norma diaria (DTO 67/2014, 15-NOV-2014, DTO 10/2015, 09-JUN-2015, DTO 15/2015, 14-JUL-2015), es decir, que sobrepasan la norma de 24 hrs ( $50 \mu g/m^3$ ). Las mayores concentraciones de contaminantes se presentan durante la época invernal debido a la estabilidad de las condiciones meteorológicas, sin embargo, estas ciudades tienen características diferentes. Santiago es una ciudad al borde de estar completamente urbanizada en un valle mediterráneo, mientras que las zonas de Puchuncaví en Valparaíso y Coronel en el Biobío comparte la denominación de ser zonas de sacrificio ambiental, estas zonas están emplazadas en contextos portuarios con alta concentración industrial y principalmente plantas termoeléctricas a carbón.

### 1.1 Puchuncaví - Quintero - Concón

La zona de Puchuncaví, Quintero y Concón se encuentran al norte de la Región de Valparaíso, esta región vive un total de 1.815.902 habitantes y contiene a la tercera zona metropolitana más poblada del país conocida como el Gran Valparaíso, según los datos obtenidos del CENSO 2017. Estas tres comunas tienen el común denominador de que se encuentran cercanas a fuentes de

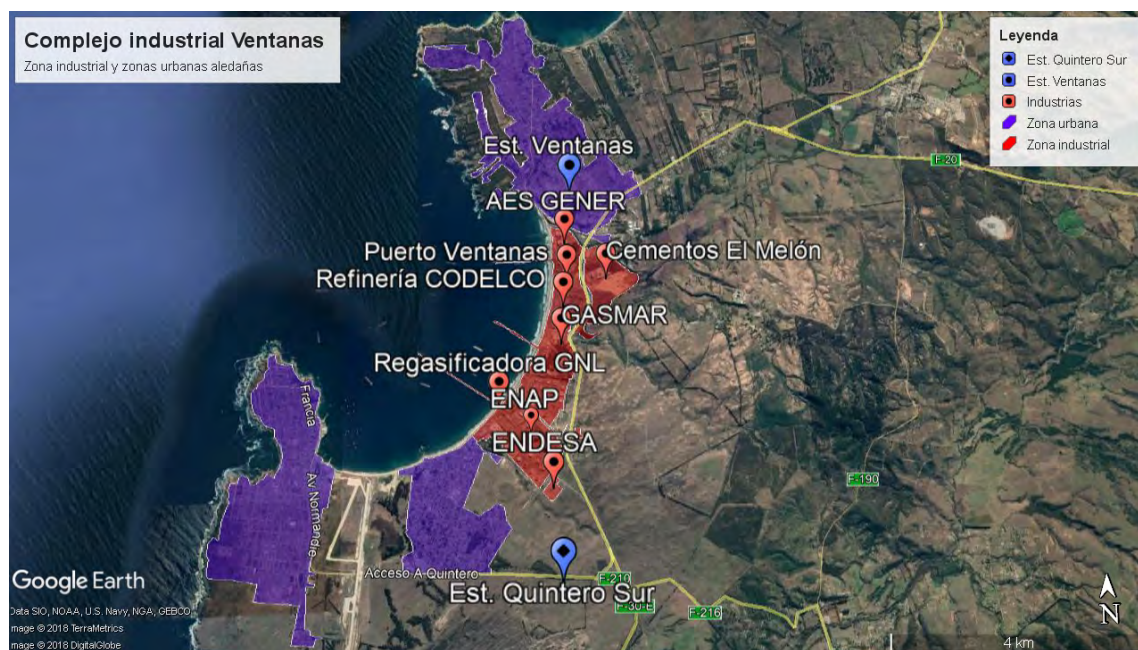
---

<sup>1</sup>Datos obtenidos del CENSO 2017 url: <https://resultados.censo2017.cl/Region?R=R05>

emisión industriales. La zona de Puchuncaví fue declarada zona saturada por anhídrido sulfuroso y material particulado respirable en 1993 (DS 346/1993). Y durante los años se han presentado distintos eventos de intoxicación en niños y adultos por nubes tóxicas de gases, como en la escolita La Greda en 2011 y 2012.

El complejo industrial Las Ventanas se encuentra cercano a Quintero y Puchuncaví, y está compuesto principalmente por la termoeléctrica AES GENER, Cementos El Melón, la refinería CODELCO, Oxiquim, GASMAR, ENAP y GNL Quintero.

En la figura 1.1 se puede observar la distribución de la zona industrial y los poblados aledaños al complejo industrial Las Ventanas. Este está compuesto principalmente por la termoeléctrica AES GENER, Cementos El Melón, la refinería CODELCO, Oxiquim, GASMAR, ENAP y GNL Quintero.



**Figura 1.1.** Mapa donde se presentan las zonas urbanas e industriales de Quintero-Puchuncaví. Fuente: elaboración propia a partir de Google Earth

AES GENER es una de las empresas termoeléctricas más importantes de Chile en cuanto a capacidad instalada, la central de Ventanas posee cuatro unidades en operación con una capacidad instalada de 884 [MW] y funciona a carbón y vapor <sup>2</sup>.

Cementos El Melón posee en Ventanas un domo de almacenamiento de Clinker que es transportado desde el puerto Ventanas mediante cintas transportadoras. Cuando el clinker se encuentra

<sup>2</sup>Información obtenida de AES Gener, url: <https://www.aesgener.cl/Lists/Centrales/DispForm.aspx?ID=5>

listo para ser despachado es cargado en distintas tolvas y este procedimiento no cuenta con ningún tipo de control <sup>3</sup>.

CODELCO división Ventanas es una fundición y refinería en donde se procesan los concentrados de cobre para producir principalmente ánodos y cátodos. Esta división tiene una capacidad anual de producción de 420.000 toneladas en su fundición, 400.000 toneladas en su refinería y 360.000 toneladas de ácido sulfúrico.<sup>4</sup>

Oxiquim provee servicios terminales marítimos para graneles líquidos en la bahía de Quintero, donde se almacenan distintos productos químicos (metano, estireno, acetato de etilo, etc), tiene una capacidad de almacenamiento de 126.000 [m3] divididos en 37 estanques <sup>5</sup>.

GASMAR es un importador mayorista de gas licuado abastecido por vía marítima. GASMAR posee 4 estanques de almacenamiento en Quintero que suman una capacidad de 85.000 [m3] <sup>6</sup>.

ENAP posee un terminal en la bahía de Quintero donde se almacenan petróleos crudos y son transportados mediante oleoductos submarinos a los estanques al interior del terminal para posteriormente ser enviados a la refinería de Concón. En el terminal se encuentra en operación una caldera de vapor utilizada para el calentamiento del crudo y utiliza petróleo como combustible. Esta caldera no cuenta con un monitoreo de emisiones y registra un consumo de combustible de 592 kg/hr.

GNL Quintero posee un muelle que permite descargar GNL desde los barcos al terminal. Además posee 3 tanques de almacenamiento antes de someter el producto al proceso de regasificación <sup>7</sup>.

Alrededor de la zona industrial se encuentran zonas urbanizadas como Puchuncaví y Quintero donde se instalaron sitios de monitoreo, por los antecedentes expuestos en los párrafos anteriores es que se espera encontrar altas contribuciones de fuentes industriales y emisiones locales como quema de biomasa, principalmente.

---

<sup>3</sup>Información obtenida del informe Diagnóstico de la calidad del aire y propuesta de una red integrada de calidad del aire-emisiones-meteorología para la zona industrial de Concón-Quintero-Puchuncaví-Ventanas, elaborado por el CMMCH

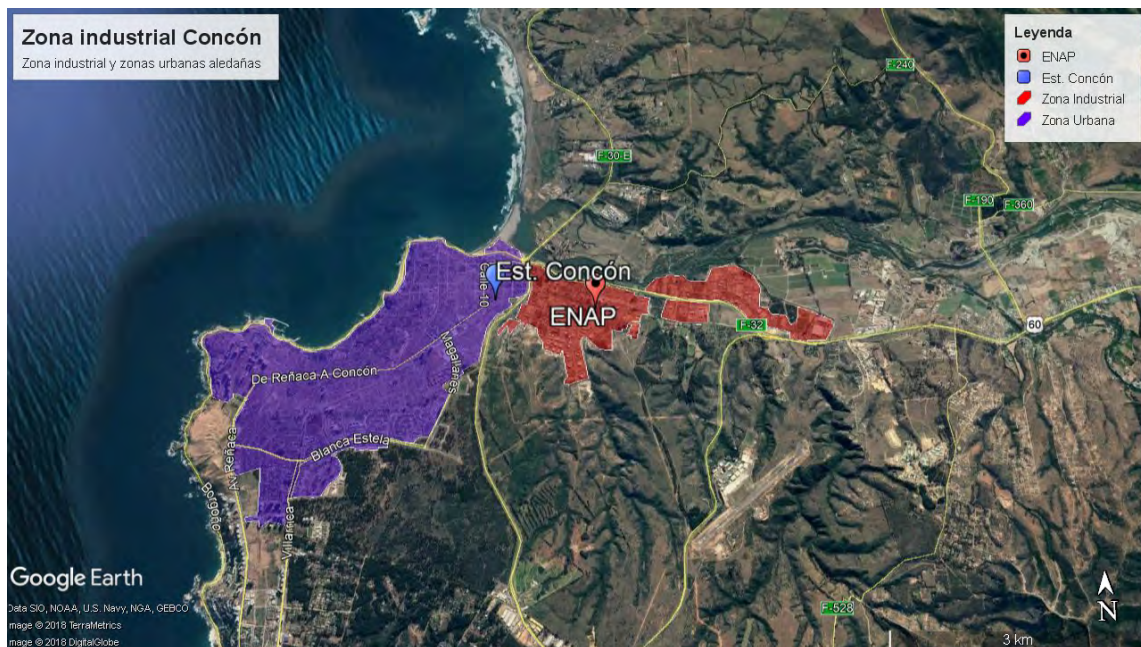
<sup>4</sup>Información obtenida de CODELCO url: <https://www.codelco.com/division-ventanas/prontuscodeco/2016-02-25/165525.html>

<sup>5</sup>Información obtenida de OXIQIUM S.A url: <https://www.oxiquim.com/areas-de-negocios/terminales/>

<sup>6</sup>Información obtenida de GASMAR S.A url:<http://www.gasmar.cl/historias>

<sup>7</sup>Información obtenida de GNL Quintero url: <http://www.gnlquintero.com/terminal/infraestructura/tanques>

Concón es una comuna costera al sur de Quintero, posee una importante fuente industrial que es la refinería de petróleo ENAP Aconcagua, que produce la mayor parte de los combustibles que consume la región metropolitana. Aquí se procesan hasta 104.000 barriles/día de petróleo crudo <sup>8</sup>. La comparación entre la zona urbana e industrial queda representada en la figura 1.2.



**Figura 1.2.** Mapa donde se presentan las zonas urbanas e industriales de Concón. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth

## 1.2 Santiago

La Ciudad de Santiago, Región Metropolitana, alberga una población de 7.112.808 personas, según los resultados del CENSO 2017, lo que la hace el principal núcleo urbano del país, y posee una superficie total de 837,89 [Km<sup>2</sup>].

Se ubica en la depresión intermedia de la zona central de Chile, al oeste de la cordillera de Los Andes, y al este de la cordillera de la costa, además la cuenca está parcialmente confinada al norte y al sur por cordones montañosos transversales, es esta condición de rodeo montañoso la que hace dificultoso el movimiento de masas de aire. En el ámbito climatológico, la región donde nos encontramos está altamente influenciada por el anticiclón subtropical del Pacífico la mayor parte del año, resultando en una persistente inversión térmica de subsidencia y clima semi árido, con precipitaciones anuales cercanas a 300 mm durante meses de invierno. La combinación de estas

<sup>8</sup>Información obtenida de ENAP-Concón url: [https://www.enap.cl/pag/94/891/refineria\\_aconcagua](https://www.enap.cl/pag/94/891/refineria_aconcagua)



condiciones geográficas y meteorológicas de la cuenca resultan desfavorables para la circulación de los contaminantes, sumados al confinamiento geográfico y alta emisión antropogénica haciendo de Santiago una de las ciudades que presenta más contaminación por partículas en suspensión y gases especialmente en los meses de otoño e invierno donde ocurre el estancamiento de la capa de inversión térmica como indica la figura 1.3



**Figura 1.3.** Imagen donde se observa el estancamiento de la capa de inversión térmica. Fuente: Elaboración Propia

El diagnóstico de la calidad del aire por contaminantes criterios (gases y partículas) actualizado al año 2015 indica un estado de Saturación por  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  (normas diaria y anual),  $O_3$  (norma de 8 horas); y de Latencia por monóxido de carbono  $CO$  (norma de 8 horas); mientras que está en cumplimiento para  $CO$  (norma horaria),  $NO_2$  y  $SO_2$ . Históricamente, la contaminación por partículas ha sido el principal problema en la RM y por ello se implementó el primer Plan de Descontaminación en 1998 (D.S.16/1998), siendo actualizado en tres oportunidades en el 2004 (D.S. 58/2004), el 2010 (D.S.66/2010) y el 2017 (D.S.31/2017). Desde un inicio las medidas estuvieron enfocadas en la reducción de los niveles de  $MP_{2,5}$ . Han sido casi 26 años de gestión de la calidad del aire, donde se evidencian cambios estructurales en los patrones de producción y consumo de recursos

y energía en la RM, que han permitido una reducción de la contaminación por  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$ . Se destaca el mejoramiento de la calidad de los combustibles usados por el transporte: i) gasolinas sin plomo y reducción en la concentración de azufre en las gasolinas y el diésel; ii) la introducción del gas natural a la matriz energética; iii) exigencias de metas de emisión de  $NO_x$  y material particulado a la industria; iv) una transformación radical del transporte público con Transantiago y la extensión de las redes de Metro; v) un control estricto del mercado automotriz, en términos de incorporar progresivamente vehículos más limpios.

### 1.3 Concepción

La región del Biobío está ubicada en el centro-sur del país, conformada por 33 comunas que abarcan un total del 4,9% del territorio Chileno americano e insular y viven aproximadamente 1.556.805 personas. Gran Concepción se le llama al área de la región compuesta por las comunas de Concepción, Coronel, Chiguayante, Hualpén, Hualqui, Lota, Penco, San Pedro de la Paz, Talcahuano y Tomé, que en conjunto abarcan una población de 973.285 personas según los resultados del CENSO 2017, lo que la hace la segunda zona metropolitana más poblada después de la RM y contiene los puertos y zonas industriales de Coronel, Talcahuano y San Vicente.

El Gran Concepción ha tenido un paulatino incremento en las actividades industriales y servicios, por lo que es una de las tres grandes metrópolis del país, conformando un importante polo industrial. Dicho carácter asociado a la industria fue impulsado por proyectos clave para la economía nacional y regional como fomento a la electricidad, petróleo (ENAP y plantas petroquímicas), tratamiento del acero (Siderúrgica Huachipato CAP), industria pesquera e industria forestal (plantas de celulosa). La instalación de las industrias favorece una rápida expansión urbana, incluso superando al crecimiento experimentado por Santiago en las décadas del 50 y 70 (Almuna, Alonso, & Manríquez, 2012).

La región del Biobío presenta otras 2 de las comúnmente llamadas zonas de sacrificio ambiental, han sido declaradas zonas saturadas por material particulado fino (norma diaria) en 2016 (DS 15/2015) y zona de latencia por material particulado respirable en 2006 (DS 41/2006), por lo que se ha elaborado el plan de prevención y de descontaminación atmosférica para las comunas del Concepción Metropolitano (DS 06/2018). Estas zonas de sacrificio se encuentran en las comunas de Coronel y Talcahuano, y al igual que Puchuncaví, se emplazan en un contexto costero y portuario con alta densidad industrial, como indican las figuras 1.4 y 1.5.

En la figura 1.4 se observa la zona de Coronel, una comuna a 30 km al sur de Concepción que posee 99 [Km<sup>2</sup>] de superficie urbana, en la figura la zona urbana más cercana a las fuente industrial

contempla una superficie de 14.57 [km<sup>2</sup>] mientras que la superficie industrial es de 6.36 [km<sup>2</sup>], es decir, un 43% del área urbana colindante.



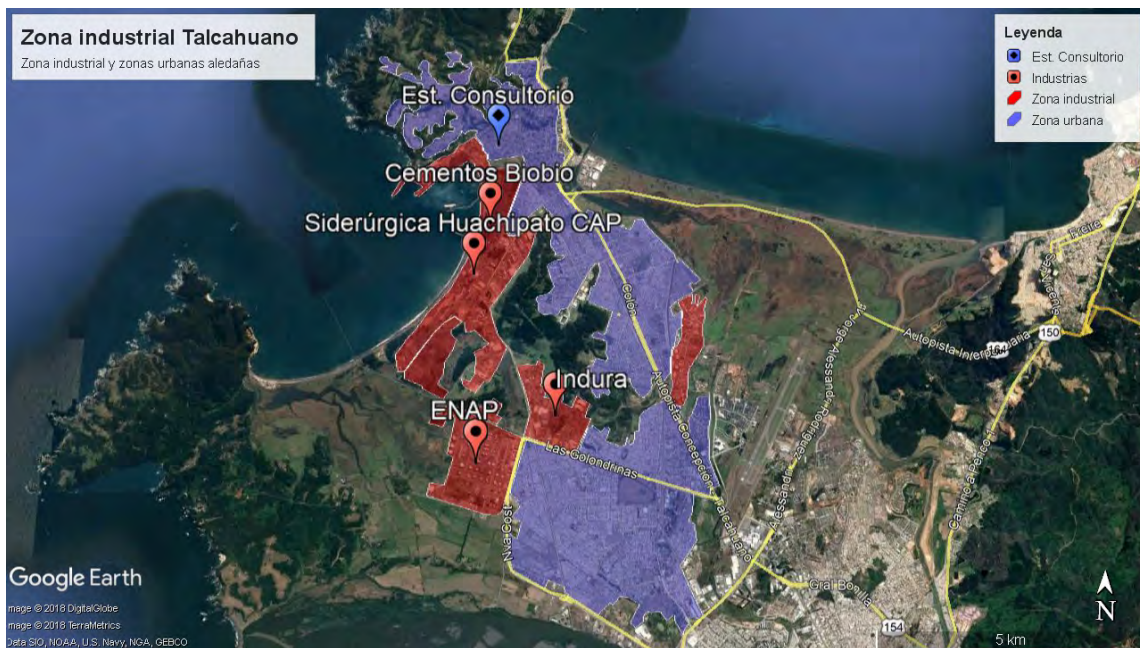
**Figura 1.4.** Mapa donde se presentan las zonas urbanas e industriales de Coronel. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth

Las principales termoeléctricas de la zona son la Central Termoeléctrica Santa María perteneciente a Colbún, funciona a carbón y genera 350 [MW] de potencia, y la Central Termoeléctrica Bocamina I y II perteneciente a Enel tienen una capacidad en conjunto de hasta 478 [MW] y funcionan a carbón. Bocamina se ha visto involucrado en diversos episodios de intoxicación de la comunidad por metales pesados, y se le han cursado 9 infracciones y de estas 3 se relacionan con infracciones de calidad de aire, según el registro público de sanciones del sistema de información de fiscalización ambiental <sup>9</sup>.

En la figura 1.5 se observa la comuna de Talcahuano donde se encuentra uno de los puertos más importantes del país. La economía de Talcahuano está basada principalmente en la pesca y actividades industriales y en la imagen se pueden ver las zonas urbanas e industriales que la componen. La zona urbana más expuesta al entorno industrial abarca una superficie de 23 [km<sup>2</sup>] y la zona industrial 9.79 [km<sup>2</sup>].

Una de las industrias más importantes es la refinería ENAP Biobío, en esta refinería se procesan diferentes crudos y cargas complementarias como diesel, gasolina de cracking (HDG), propileno,

<sup>9</sup>Información obtenida de la Superintendencia del Medio Ambiente url: <http://snifa.sma.gob.cl/v2/UnidadFiscalizable/Ficha/2436>



**Figura 1.5.** Mapa donde se presentan las zonas urbanas e industriales de Talcahuano. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth

coker e hidrógeno, también existen plantas de tratamiento de kerosene, gasolina y gas licuado. Planta de sulfhidrato de sodio, recuperadoras de azufre y tratamientos de gases <sup>10</sup>. Otras instalaciones industriales son los oleoductos para transportar productos terminados desde la refinería hasta distintas ciudades cercanas.

También se encuentra la planta de cementos Biobío, principal fabricante nacional del mismo y con la mayor capacidad de producción puesto que posee los mayores yacimientos de piedra caliza. Esta piedra ya molida y triturada es procesada en la planta para luego ser mezclada con diversas materias primas, molida en rodillos para obtener un polvo fino y almacenarlo en rodillos de crudo. Parte del proceso productivo que sea realiza en esta planta es la etapa de clinkerización donde se producen las reacciones químicas para convertir el crudo en clinker y finalmente reducir este a un polvo fino para obtener cemento <sup>11</sup>.

La siderúrgica de Huachipato es una planta siderúrgica chilena dedicada a la elaboración del acero, y administrada por la filiar Compañía de Acero del Pacífico (CAP). Diversas materias primas como hierro, carbón y caliza son reducidos en la planta produciendo arrabio y coque metalúrgico. Estos productos pasan por una etapa de desulfurización antes de ser refinados para producir distintos

<sup>10</sup>Información obtenida de ENAP, url: <https://www.enap.cl/pag/80/870/refineria-biobio>

<sup>11</sup>información obtenida de: Cementos BIOBIO url: <https://biobiocementos.cl/recursos/proceso-productivo/>



tipos de acero <sup>12</sup>.

---

<sup>12</sup>Información obtenida de CAP aceros, url: <http://www.capacero.cl/cap-acero/site/edic/base/port/infografia.html>

## Capítulo 2

### Metodología

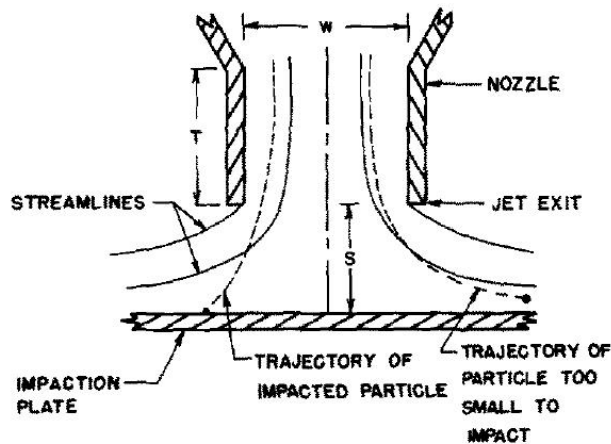
A continuación, se describirán los recursos utilizados para realizar el estudio, desde los equipos utilizados, pasando por la elección de los sitios de monitoreo, hasta los modelos para el análisis de los resultados.

#### 2.1 Equipos utilizados

Los equipos utilizados para realizar este estudio son monitores discretos de material particulado mediante técnicas gravimétricas, el Harvard Impactor y el Kleinfiltergerät, ambos métodos referenciales aprobados por la EPA descritos en las secciones siguientes.

##### 2.1.1 Harvard Impactor

El muestreador tipo Harvard o impactador de Harvard (de ahora en adelante HI) es un equipo para medir de manera gravimétrica la concentración de partículas suspendidas en el aire. Fue desarrollado en 1992 por investigadores de la universidad de Harvard (Marple, Rubow, Turner, & Spengler, 1987). El HI está diseñado con una geometría tal que discrimina las partículas por su radio aerodinámico con una curva de eficiencia de colección de  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$  muy aguda, lo que implica que la cantidad de partículas con tamaño distinto al requerido que logra pasar por el filtro es despreciable.



**Figura 2.1.** Diagrama de la geometría del impactador. Fuente: *Impactor Design. Atmospheric Environment. Vol 10. 891-896*

El impactador funciona de la siguiente forma: el flujo de aire ingresa por la toma de muestra del impactador de ancho  $w$ , como lo indica la figura 2.1 y es conducido hasta un plato impactador y posteriormente a un orificio crítico. Este diseño hace que las partículas que ingresan al sistema aumenten su velocidad y por efecto de la inercia de las partículas las más pequeñas son capaces de evitar el impactador y siguen hasta impactar al filtro, mientras que las partículas más grandes quedan atrapadas en el plato impactador. El ángulo de desviación depende de la masa de la partícula y su velocidad. Finalmente solo las partículas con radio aerodinámico de interés quedan atrapadas en el filtro gravimétrico. En la figura 2.2 se observa como luce un HI y donde se ubica el filtro colector.

Los HI están diseñados para trabajar a un flujo de 4.0 l/m. Se disponen de cabezales para muestrear  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$  y los filtros muestreados son enviados a sus laboratorios de origen para el pesaje y posterior análisis químico.



**Figura 2.2.** Cabezales del HI separados por partes, se observa que en medio de este se ubica el filtro colector de color blanco. Fuente: CMMCH

El uso del HI debe complementarse con una bitácora de mediciones, puesto que es necesario registrar manualmente los parámetros de interés como flujo de la muestra final y tiempo de muestreo.

### 2.1.2 KleinfILTERgerät

El KleinfILTERgerät, de ahora en adelante KFG, es el equipo presentado en la figura 2.3, y es otro de los equipos aceptados por la UE EN 61326-1 y EN 61010, para la recolección de material particulado. Funciona con un principio de impactador muy similar al descrito para el HI pero la geometría al ser distinta implica que la bomba de aire funciona a una tasa de  $2.3 [m^3/hr]$ , además, a diferencia del HI este equipo también mide humedad, presión y temperatura de la muestra colectada. Este equipo arroja un output con 4 datos de interés, estos son: tiempo de muestreo, hora final, volumen muestreado y volumen muestreado normalizado.



**Figura 2.3.** Imagen del KFG fuente: Manual de Usuario

## 2.2 Campañas de monitoreo

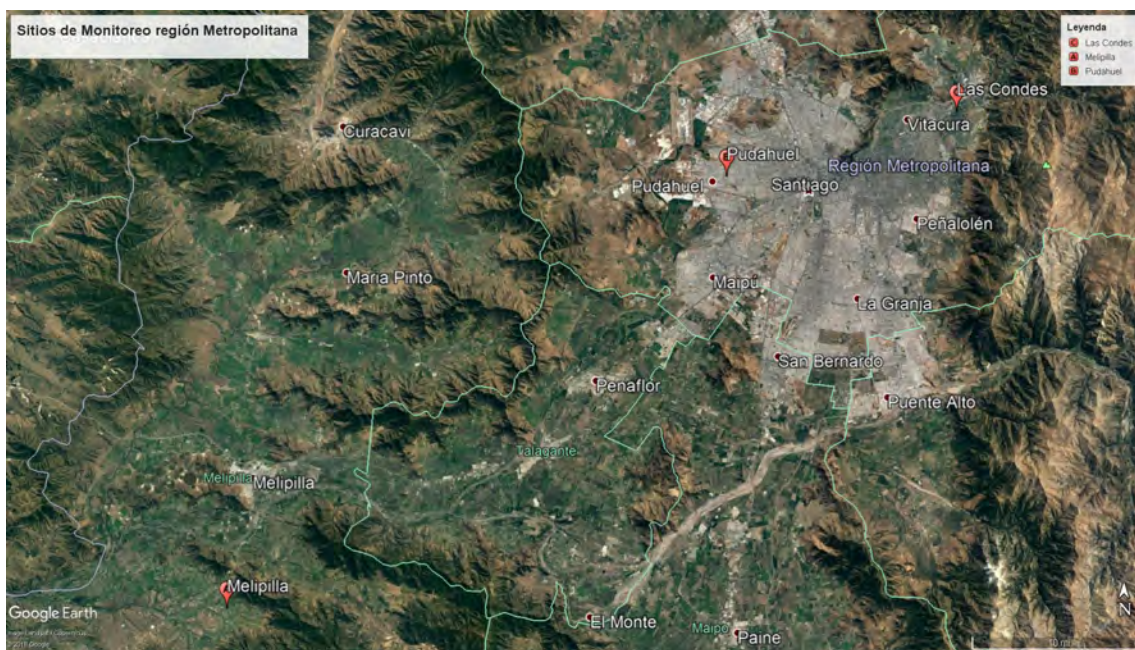
Durante los años 2016 y 2017 se tomaron muestras de MP en distintas regiones de Chile con la finalidad estudiar y caracterizar la distribución espacial de concentración de  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$  en diferentes sitios. A estas muestras se le realizaron diversos análisis químicos para la identificación de trazadores, por lo tanto, se ha logrado construir una base de datos rica y única en información.

**Tabla 2.1.** Descripción de sitios, duración y mediciones de las campañas de monitoreo

Sitio de Monitoreo y Cate- gorización	Región	Fechas de medición	Equipo utilizado y parámetros medi- dos
Melipilla, Background Ru- ral	RM	22/06/16 a 24/07/16 y 23/09/16 a 27/10/16	HI, MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub>
Pudahuel , Residencial- urbano	RM	16/06/16 a 24/07/16 y 03/11/16 a 07/12/16	HI, MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub>
Las Condes, Urbano- Receptor	RM	16/06/16 a 24/07/2016 y 03/11/16 a 07/12/16	HI, MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub>
Ventanas, Industrial	V Región	24/02/17 a 22/03/17 y 19/08/17 a 14/09/14	KFG, HI, MP <sub>2,5</sub>
Quintero, Background	V Región	08/02/17 a 23/02/17	KFG, MP <sub>2,5</sub>
Concón, Urbano- Residencial	V Región	08/02/17 a 22/03/17 y 20/08/17 a 14/09/17	KFG, MP <sub>2,5</sub>
Consultorio, Urbano	VIII Región	27/06/17 a 13/07/17 y 22/11/17 a 13/12/17	HI, MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub>
Kingston College, Back- ground Urbano	VIII Región	23/06/17 a 11/08/17 y 15/03/17 a 13/05/17	HI, MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub>
UDT, Urbano-Industrial	VIII Región	20/07/17 a 20/08/17 y 10/04/17 y 14/05/17	HI, MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub>
Hualqui, Background Ru- ral	VIII Región	14/06/17 a 11/08/17 y 17/03/17 a 13/05/17	HI, MP <sub>10</sub> y MP <sub>2,5</sub>

### 2.2.1 Campaña de monitoreo Santiago

En la figura 2.4, se presentan los sitios de monitoreo dentro de la Región Metropolitana, y se observa que la estación Las Condes y Pudahuel se encuentran localizados dentro de la urbe, cercanos a importantes avenidas, mientras que la estación Melipilla se encuentra alejada de la ciudad, en un entorno menos expuesto a emisiones directas.



**Figura 2.4.** Mapa donde se identifican los sitios de monitoreo pertenecientes a la región Metropolitana.  
 Fuente: Elaboración Propia a partir de Google Earth

Para el sitio de Las Condes se utilizó la estación de monitoreo de calidad de aire perteneciente al Ministerio del Medio Ambiente, y se instaló el equipo HI en el techo de la estación como lo indica la figura 2.5. La estación Las Condes se encuentra al interior del estadio CORFO, muy cercano a Av. Las Condes, a la autopista Costanera Norte, y en sus alrededores también hay sectores residenciales. Es por esto que se espera alta contribución de biomasa, polvo suspendido y emisiones vehiculares.



**Figura 2.5.** *Equipo HI en el techo de la estación Las Condes*

Para el sitio de Pudahuel se utilizó la estación de monitoreo de calidad de aire perteneciente al Ministerio del Medio Ambiente, y se instaló el equipo HI en el techo de la estación, como indica la figura 2.6. La estación Pudahuel se encuentra al interior del SAR La Estrella, muy cercano a Av. La Estrella y rodeado de un sector residencial. Se espera encontrar alta contribución de Biomasa, emisiones vehiculares y polvo resuspendido.

Al inicio de la campaña de monitoreo el SAR estaba terminando su proceso de remodelación por lo que también se esperan fuentes emisoras por construcción.

La estación de Melipilla se encuentra al interior de una parcela en Culiprán, alejada de congestionadas avenidas y calles principales, por lo que solo se espera medir concentración background y aerosoles marinos.





**Figura 2.6.** Equipo HI en el techo de la estación Pudahuel

Para Santiago se manipuló un inventario de 222 filtros de  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$ , los que fueron muestreados en 2 campañas de monitoreo definidas por temporadas, 103 en la campaña Otoño-Invierno, y 105 en la campaña Primavera-Verano.

**Tabla 2.2.** Tabla de filtros muestreados en Santiago detallados por corte y sitio

Sitio	Muestras $MP_{2.5}$	Muestras $MP_{10}$	Total x sitio
Las Condes	76	76	152
Pudahuel	70	70	140
Melipilla	76	76	152
Total	222	222	444

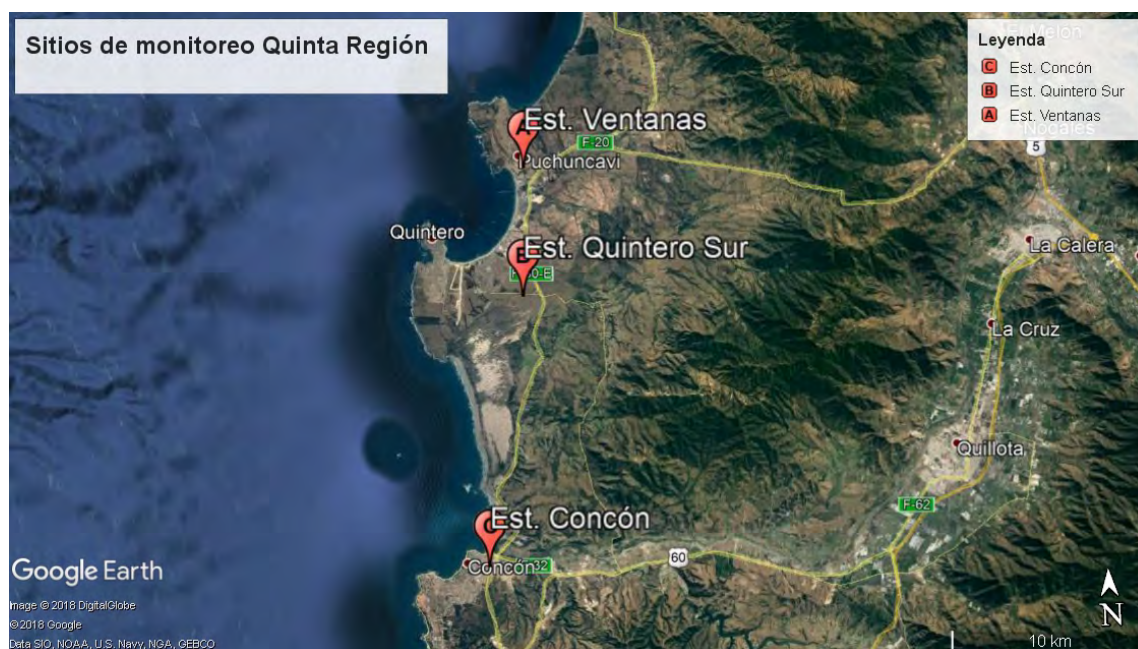
Las muestras detalladas en la tabla 2.2 fueron colectadas a una altura promedio de 2 metros sobre el suelo, mediante impactadores de Harvard que utilizan filtros de Teflón de 37 mm, posterior a la

colección de MP, los filtros son sellados y enviados análisis en sus laboratorios de origen, para este caso, los laboratorios de gravimetría y análisis de elementos fueron la Universidad de Wisconsin y la Universidad de Harvard.

Finalmente los parámetros meteorológicos como humedad relativa, temperatura ambiente, velocidad de viento y precipitaciones locales se obtuvieron de plataformas gubernamentales como lo son la Red De monitoreo Nacional SINCA, la Dirección Meteorológica de Chile DMC, y plataformas de redes de monitoreo privadas.

## 2.2.2 Campaña de monitoreo Puchuncaví

En la figura 2.7 se presentan los tres sitios de monitoreo de la quinta región. Estos sitios fueron ubicados en Concón, Quintero y la localidad de Ventanas.



**Figura 2.7.** Mapa donde se identifican los sitios de monitoreo pertenecientes a la Quinta Región. Fuente: Elaboración Propia a partir de Google Earth

Para el sitio de monitoreo en Concón se facilitaron las instalaciones de la sexta compañía de bomberos de Concón (figura 2.8), el equipo de medición KFG se instaló en el patio del cuartel (figura 2.9). La compañía se encuentra a 1,5 [Km] de la llama principal de la refinería y expuesta a las emisiones de las calles locales.



**Figura 2.8.** *Fotografía de la entrada del cuartel de bomberos donde se instaló el KFG.*



**Figura 2.9.** *Fotografía del equipo KFG instalado en el patio de la compañía de bomberos.*

Para la estación de monitoreo de Quintero se facilitaron las instalaciones de la estación transmisora de la Armada de Chile (ver figura 2.10). Esta estación se encuentra en la entrada principal de Quintero en un sector vasto y plano, sin grandes obstrucciones alrededor. El equipo de monitoreo discreto KFG se instaló en el techo de la sala de antenas. La estación se encuentra a 0.19 [km] lineales de la carretera F-210, que es el camino principal para entrar a la comuna de Quintero, es por esto que la carretera es altamente concurrida por camiones, transporte público y privado.



**Figura 2.10.** Fotografía de la entrada del de la estación transmisora de la Armada de Chile, Quintero.



**Figura 2.11.** Fotografía de la instalación del equipo KFG en el techo de la estación de antenas.

La estación de monitoreo Ventanas se encuentra emplazada al interior de la Fundación Las Rosas de Ventanas, y se encuentra aproximadamente a 1,5 [km] del complejo industrial Las Ventanas que está compuesto principalmente por la termoeléctrica AES GENER, Cementos El Melón, la refinería CODELCO, Oxiquim, GASMAR, ENAP y GNL Quintero.





**Figura 2.12.** Fotografía de la entrada a la estación de monitoreo Ventanas



**Figura 2.13.** Vista del complejo industrial Ventanas desde la estación de monitoreo

Alrededor de las zonas industriales se encuentra Ventanas, Quintero y Concón. Es por estos últimos antecedentes que se esperan encontrar altas contribuciones de fuentes industriales y emisiones locales urbanas como quema de biomasa, principalmente.

Todas las muestras fueron colectadas a una altura promedio de 2 metros sobre el suelo, mediante KFG con filtros de teflón de 47 [mm]. Posterior a la colección los filtros son sellados y enviados a análisis por XRF en sus laboratorios de origen, para este caso, los laboratorios de gravimetría y análisis de elementos fueron la Universidad de Wisconsin y la Universidad de Harvard.

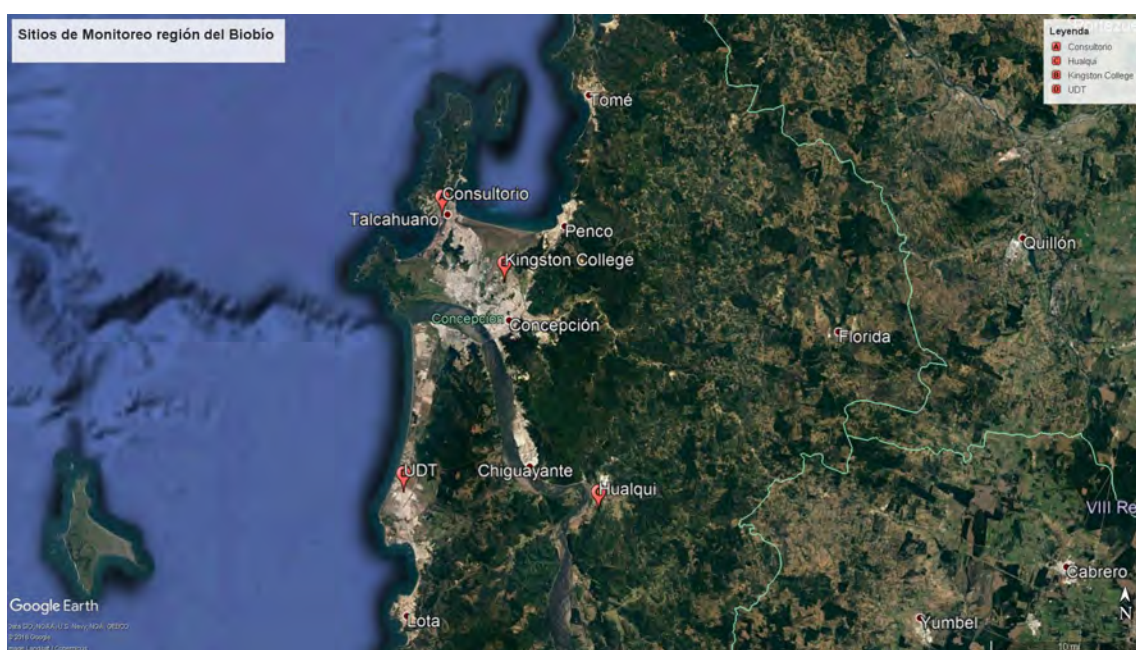
Finalmente los parámetros meteorológicos como humedad relativa, temperatura ambiente, velocidad de viento y precipitaciones locales se obtuvieron de plataformas gubernamentales como lo son la Red De monitoreo Nacional SINCA, la Dirección Meteorológica de Chile DMC, y plataformas de monitoreo privadas.

**Tabla 2.3.** Tabla de filtros muestreados en cordón industrial Concón-Puchuncaví detallados por corte y sitio

Sitio	Muestras MP <sub>2,5</sub>	Muestras MP <sub>10</sub>	Total x sitio
Concón	68	68	136
Quintero	16	0	16
Ventanas	54	54	108
Total	138	122	260

### 2.2.3 Campaña de monitoreo en Concepción

En la figura 2.14 se presentan los 4 sitios de monitoreo georreferenciados, estos se encuentran en la comuna de Talcahuano, Concepción, Coronel y Hualqui.

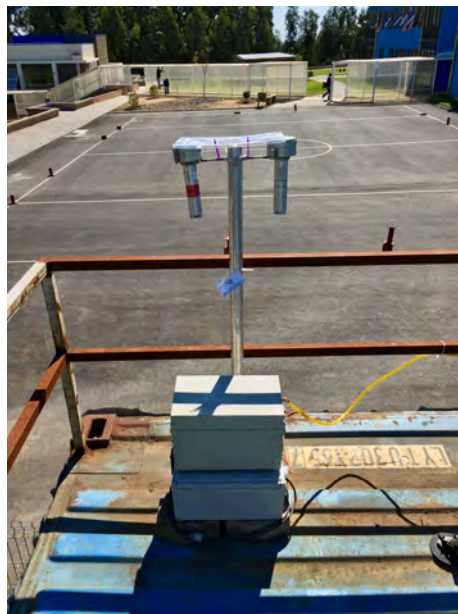


**Figura 2.14.** Mapa donde se identifican los sitios de monitoreo pertenecientes a la región del Biobío. Fuente: elaboración propia a partir de Google Earth

La estación Kingston College (de ahora en adelante KC), es una estación perteneciente a la Seremi de Medio ambiente que se encuentra en un complejo educacional del mismo nombre (ver figura 2.16), y es clasificada como background urbano, dado que se encuentra en una zona céntrica de la comuna de Concepción al interior del colegio Kingston College como indica la figura y se encuentra a aproximadamente 6 [km] de distancia de las fuentes industriales del puerto de Talcahuano. En esta estación se tomaron 98 muestras de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub>.



**Figura 2.15.** Estación de monitoreo Kingston College donde se instaló el equipo discreto de material particulado



**Figura 2.16.** Vista del equipo KFG desde el interior del colegio Kingston College

La estación denominada Unidad de Desarrollo Tecnológico (de ahora en adelante UDT) se encuentra al interior de la Unidad de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción(ver figura 2.17), el equipo se instaló en el techo del laboratorio del edificio principal. Este sitio de monitoreo se encuentra a 5.7 [Km] lineales de la C.T. Bocamina y a 8.0 [km] lineales de la C.T. Santa María, principales fuentes emisoras de la zona, es así que por su ubicación las mediciones que se realizarán representarían el aporte industrial de Coronel al material particulado. En esta



estación se tomaron 57 muestras de  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$  .



**Figura 2.17.** Estación de monitoreo UDT donde se instaló el equipo discreto de material particulado



**Figura 2.18.** Vista del equipo KFG, instalado en el techo del laboratorio de UDT

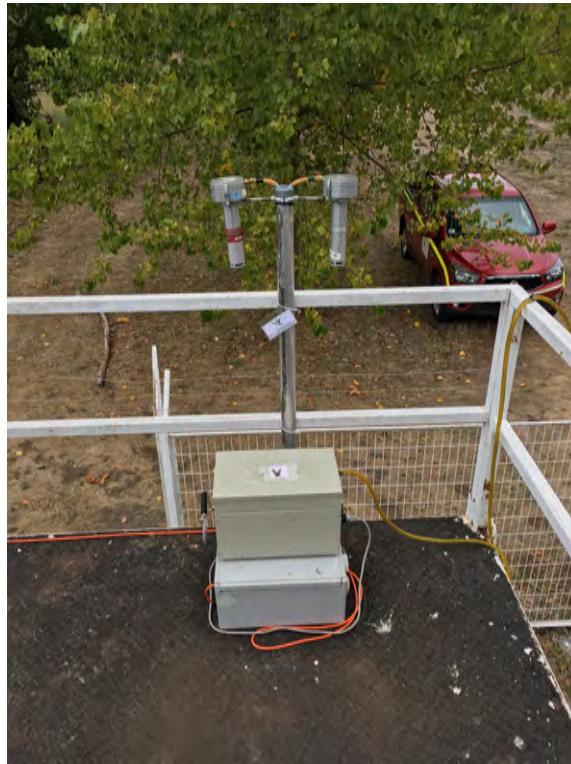
Hualqui se encuentra al interior del Campo Recreacional y Vacacional del Personal de Petrox S.A., por su ubicación alejada más de 20 [km] de fuentes directas de emisión se considera como la estación background rural del área de estudio (ver figura 2.19). En esta estación se tomaron 92



muestras de  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$  .



**Figura 2.19.** Estación de monitoreo Hualqui donde se instaló el equipo discreto de material particulado



**Figura 2.20.** Vista del equipo KFG sobre el techo de la estación Hualqui

Consultorio es una estación de monitoreo que se encuentra en el interior del Centro de Salud San Vicente de Talcahuano, en el período de medición el Centro de salud se encontraba en remodelación, por lo que se esperan resultados afectados por este tipo de emisiones. Además, la estación San Vicente se encuentra altamente expuesta a aerosoles marinos y fuentes industriales debido a su cercanía al océano (640 [m]) y al puerto de Talcahuano (400 [m]) donde se encuentran las principales fuentes industriales del sector. En esta estación se tomaron 49 muestras de  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$ .



**Figura 2.21.** *Vista estación de monitoreo Consultorio, Talcahuano*



**Figura 2.22.** *Vista del equipo HI sobre la estación de monitoreo Consultorio, Talcahuano*

Todas las muestras detalladas en la tabla 2.4 fueron colectadas a una altura promedio de 2 metros sobre el suelo, mediante HI con filtros de teflón de 37 [mm]. Posterior a la colección los filtros son sellados y enviados a análisis por XRF en sus laboratorios de origen, para este caso, los laboratorios de gravimetría y análisis de elementos fueron la Universidad de Wisconsin y la Universidad de Harvard.

Finalmente los parámetros meteorológicos como humedad relativa, temperatura ambiente, veloci-

**Tabla 2.4.** *Tabla de filtros muestreados en Concepción detallados por corte y sitio*

Sitio	Muestras MP <sub>2.5</sub>	Muestras MP <sub>10</sub>	Total por sitio
KC	98	98	196
Hualqui	92	92	184
UDT	57	57	114
Consultorio	33	33	66
Total	280	280	560

dad de viento y precipitaciones locales se obtuvieron de plataformas gubernamentales como lo son la Red De monitoreo Nacional SINCA, la Dirección Meteorológica de Chile DMC, y plataformas de monitoreo privadas.

## 2.3 Regresión lineal multivariada

Un análisis de regresión se usa para describir la relación entre una variable de respuesta Y y una o más variables predictoras X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>... X<sub>n</sub>, cuando  $n > 1$  entonces se habla de regresión multivariada. El modelo multivariado utilizado permitió explicar la variabilidad de diferentes especies en función del efecto de diferentes variables categóricas predictoras. Para este trabajo se realizaron regresiones multivariadas para el MP<sub>10</sub>, MP<sub>2.5</sub> y su composición química respectiva (especies) en función de las variables meteorológicas (humedad, temperatura, velocidad del viento, precipitaciones), sitios de monitoreo (Las Condes, Pudahuel, Culiprán, UDT, KC, Hualqui, Consultorio, Quintero, Ventanas, Concón), campaña de monitoreo (Invernal y estival), y día de la semana (Lunes-Domingo).

La finalidad de aplicar un modelo de regresión multivariado es poder explicar la concentración de MP y de elementos bajo la modalidad de Factor de Impacto por Concentración (FIC) (Koutrakis et al., 2005).

Se ha supuesto que la concentración de los contaminantes atmosféricos (MP y especies) se asemejan más bien una distribución log-normal que a una normal. Es por esto que se ha decidido utilizar el logaritmo natural de la concentración del contaminante en lugar de la concentración directamente.

Por otra parte, el modelo estadístico requiere que las variables explicativas (X<sub>n</sub>) estén expresadas como variables categóricas, acorde con la siguiente ecuación:

$$\ln[MP] = \alpha + \sum\beta_{sj} * s_j + \sum\beta_{tpdj} * tpdj + \sum\beta_{dsj} * dsj + \sum\beta_{tmpj} * tmpj + \sum\beta_{hrj} * hrj + \sum\beta_{vvj} * vvj + \sum\beta_{ppj} * ppj \quad (2.1)$$

Donde  $\alpha$  es el intercepto de la regresión, y los términos siguientes son los coeficientes de las variables categóricas: sitio,  $s_j$ , ( $j=1-10$ ); temporada,  $tpdj$  ( $j=1-2$ ); Día de la semana,  $dsj$ , ( $j=1-7$ ), temperatura,  $tmpj$ , ( $j=1-2$ ), humedad relativa,  $hrj$ , ( $j=1-2$ ), velocidad de viento,  $vvj$ , ( $j=1-3$ ), y precipitaciones,  $ppj$ , ( $j=1-2$ ). Las variables meteorológicas continuas (humedad, temperatura, etc) se han dicotomizado y tricotomizado acorde como sigue:

- (i). Para temperatura se dicotomizó en base al siguiente rango;  $T \geq 10^\circ\text{C} = 1$  y  $T < 10^\circ\text{C} = 2$ .
- (ii). Para humedad se dicotomizó en base al siguiente rango:  $HR \geq 70\% = 1$  y  $HR < 70\% = 2$ .
- (iii). Para precipitaciones se dicotomizó en base al siguiente rango;  $PP \geq 1[\text{mm}] = 1$  y  $PP < 1[\text{mm}] = 2$ .
- (iv). Para la magnitud del viento se tricotomizó en base al siguiente rango;  $|V| < 0.8 [\text{m/s}] = 1$ ,  $0.8 < |V| < 1.6 [\text{m/s}] = 2$  y  $|V| > 1.6 [\text{m/s}] = 3$ .

Siguiendo el razonamiento de la ecuación 2.1 y aplicando la función exponencial, la concentración de MP se puede expresar como el producto de términos exponenciales que por simplicidad finalmente puede representarse en la siguiente expresión:

$$(MP) = I * f_{sitioj} * f_{temporadaj} * f_{diesemanaj} * f_{tmpj} * f_{hrj} * f_{vvj} * f_{ppj} \quad (2.2)$$

Donde  $f_{ij} = \exp[\sum\beta_{ij} * i_j]$  es el factor de impacto de la variable  $i$  de una categoría  $j$  (e.g.,  $i$ = sitio,  $j$  = Las Condes).

Los FIC que entrega el modelo son valores relativos a niveles de referencia definidos a priori durante el análisis de regresión (los niveles de referencia usados en este estudio se describen en la sección de resultados). Por lo tanto, los FIC se interpretan como aumentos o disminuciones de la concentración atribuido a la variación de una variable explicativa, respecto del nivel de referencia definido.

Los resultados de este análisis se discutirán en términos del factor de impacto de la concentración, un factor de impacto mayor que uno (1) indica una concentración de MP (o especies) mayor que el nivel de referencia, esto facilita la comparación entre las diferentes variables categóricas.

## 2.4 Positive matrix factorization PMF

Los modelos receptores son herramientas ampliamente usadas para examinar datos de medio ambiente. En particular EPA PMF es uno de estos modelos y funciona resolviendo la ecuación de balance químico entre un factor de contribución y un factor de perfiles con el fin de entender y determinar las fuentes que contribuyen de la muestra de datos (Paatero, 1997).

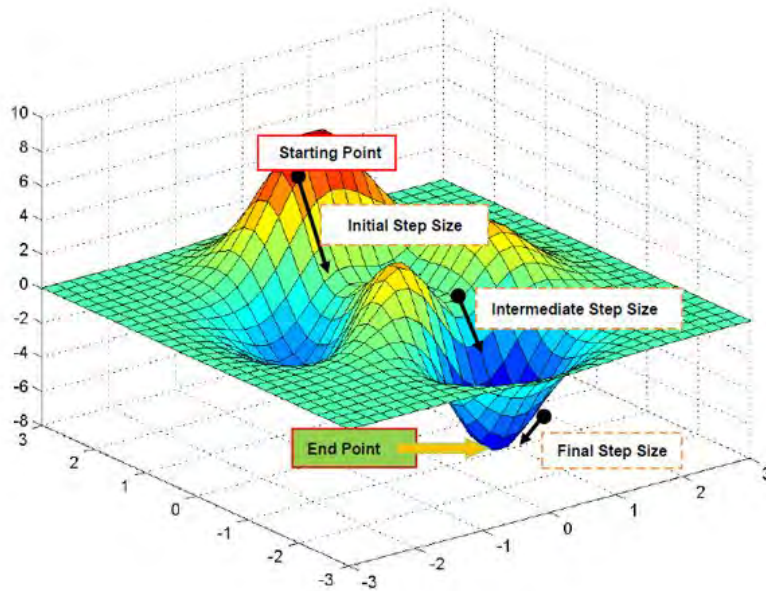
$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (2.3)$$

Un set de datos de especies puede ser visto como una matriz X de dimensiones  $i \times j$  donde i son las muestras y j las especies medidas, que en este caso serán los elementos presentes en el material particulado; p es el número de factores;  $f_{kj}$  es el perfil de la especie para cada factor k;  $g_{ik}$  es la contribución de la masa para de cada factor k para cada muestra i; y  $e_{ij}$  son los residuos para cada muestra/especie. El objetivo del modelo es determinar el factor de contribución (G) y perfiles (F), minimizando la suma de los residuos cuadrados ponderados por la incertidumbre de las concentraciones elementales  $u_{ij}$  y para lograr esto se define un parámetro crítico denotado por Q que corresponde al factor en que los residuos son mínimos.

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [e_{ij}/u_{ij}]^2 \quad (2.4)$$

El algoritmo usado para resolver la ecuación 2.4 es el ME-2 que obtiene la convergencia a un mínimo de Q mediante iteraciones como ilustra la figura 2.23. El Q mínimo puede ser global o local, aquí el usuario del programa puede determinar cuales Q son globales o locales usando diferentes puntos de partida para el proceso iterativo y comparar los Q mínimos obtenidos (Brown, Eberly, Paatero, & Norris, 2015).

La variabilidad y estabilidad de los resultados del modelo son evaluados usando tres métodos de validación descritos a continuación.



**Figura 2.23.** Representación del método ME-2, usado para encontrar el  $Q$  mínimo. Fuente: Manual de Usuario PMF

- (i). Análisis Bootstrap (BS): Es usado para identificar si los efectos de pequeños set de muestras afectan desproporcionadamente la solución. Consiste en que múltiples soluciones son generadas usando pequeños grupos del set de datos elegidos al azar creando un nuevo input de datos con el mismo numero de dimensiones (ixj) que el data set original. Luego el PMF vuelve a correr sobre este data set "re muestreado", y cada factor BS es mapeado comparando las contribuciones de los factores base (matriz G) con mayor correlación, si los factores base no se correlacionan con los factores BS entonces se considera que el factor "no está mapeado".
- (ii). Análisis de Desplazamiento (DISP): DISP explora la ambigüedad rotacional de la solución, evaluando cómo se comporta ante pequeñas variaciones. La presencia de intercambios (swaps) indica que la solución es inestable por lo que se debe disminuir el número de factores, cambiar la categoría de las especies o excluir muestras del set de datos.
- (iii). Análisis de Bootstrap-Desplazamiento (BS-DISP): Este análisis estima los errores asociados a la ambigüedad rotacional y errores aleatorios. Este análisis puede tomar varias horas debido al número de combinaciones que son evaluadas. Como su nombre lo indica BS-DISP es una combinación de los métodos BS y DISP en el que cada set re muestreado es descompuesto en matrices de perfiles y contribución y luego los elementos en F son desplazados. Intuitivamente el proceso se entiende como lo siguiente: cada set BS re-muestreado es una

solución que aleatoriamente es situada dentro del espacio rotado. Entonces el análisis DIPS determina una aproximación alrededor de la solución en ese espacio rotado. En conjunto, las aproximaciones en el espacio rotado para las soluciones ubicadas al azar representan tanto la ambigüedad rotacional como el azar para la solución modelada.



## Capítulo 3

### Resultados y Análisis

#### 3.1 Variación temporal y espacial del $MP_{10}$ sus elementos

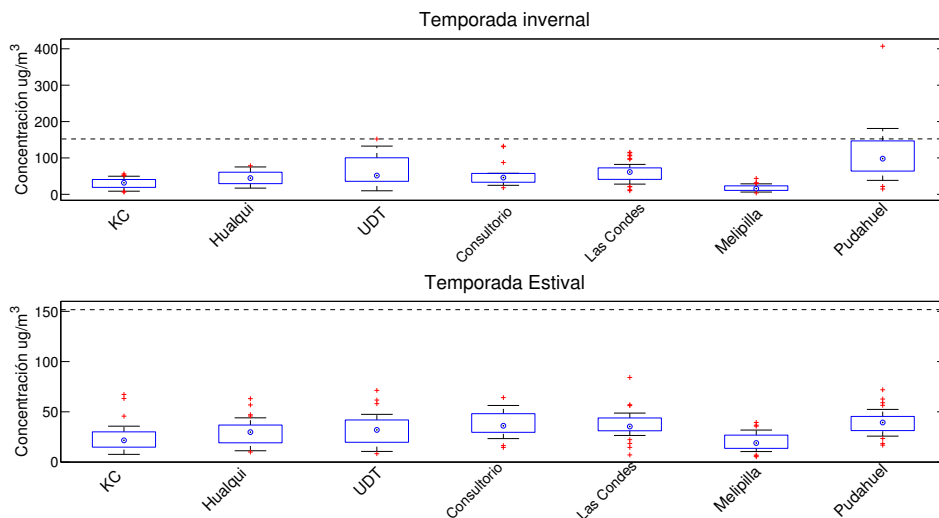
En esta sección se explican la variación temporal y espacial de los resultados de la campaña de monitoreo. Se presentan los promedios del periodo monitoreado durante los años 2016 y 2017, donde las muestras se separaron por sitio y por temporada.

La figura 3.1 muestra la distribución de concentración de material particulado respirable para cada uno de los 7 sitios, el gráfico también incluye la norma diaria decretada por el ministerio de medio ambiente ( $150 [\mu g/m^3]$ ), mostrada en una línea punteada.

Se observan valores de  $MP_{10}$  por sobre la norma en la estación Pudahuel, mientras que Melipilla es el sitio que presenta menor concentración. Con respecto a los sitios de la VIII Región es posible ver que UDT presenta los niveles más altos de concentración, muy cercanos a la norma diaria.

Es claramente visible el patrón de concentración entre temporadas, aumentando los niveles en invierno y disminuyendo en verano en todos los sitios de monitoreo, manteniendo a Melipilla como aquel sitio menos impactado.

En la tabla 3.1 se entrega el detalle de la concentración promedio de  $MP_{10}$  y sus especies identificadas para todos los sitios de monitoreo. Es posible ver que las concentraciones promedio de  $MP_{10}$  varían significativamente para cada sitio y cada temporada.



**Figura 3.1.** Distribución espacial diaria durante ambas temporadas para el  $MP_{10}$ , incluyendo la norma máxima en la línea punteada

Se ha utilizado el coeficiente invernal/estival (Inv/Est) como un indicador de comportamiento de las especies durante las distintas temporadas, En el caso de  $MP_{10}$  en Pudahuel los promedios invernales superan a los estivales hasta 2.8 veces, mientras que en Melipilla las concentraciones se mantienen similares en ambas temporadas.

Es posible ver que algunos elementos presentan una tendencia estival como es el caso del Mg, Al, Ti y Ca, elementos relacionados a polvo suspendido y probablemente emisiones de construcción. Por otra parte elementos como Pb, Se, Br, Zn, Cu, Fe, Mn y K presentan un aumento significativo en invierno. El mayor cociente (Inv/Est) de  $MP_{10}$  se encontró con mayor frecuencia en la estación de Pudahuel para, Si (2.8), K (2.1), Ca (2.3), Ti (2.3), Mn (2.7), Fe (2.5), Cu (4.2), Zn (5.8), Br (3.1), y Pb (4.0), indicando que esta estación es la que está sometida a condiciones meteorológicas más desfavorables en invierno, respecto de los otros sitios. Por otro lado, los menores cocientes (Inv/Est) $MP_{10}$  se encontraron preferentemente en los sitios de la VIII Región, especialmente aquellas especies atribuidas a impacto de aerosol marino y polvo resuspendido (Mg, Al).

**Tabla 3.1.** Concentraciones de  $MP_{10}$  en  $\mu g/m^3$  y elementos en  $ng/m^3$  para temporadas invernales (campañas realizadas en los meses de mayo a agosto) y estivales (campañas realizadas en los meses de septiembre a abril).

Elementos	Categoría	KC	Hualqui	UDT	Consultorio	Las Condes	Melipilla	Pudahuel
$MP_{10}$	Invernal	30.3	45.1	65.5	53.5	60.7	17.5	108.5
	Estival	24.1	29.4	33.0	37.9	36.9	20.3	39.3
	inv/est	1.3	1.5	1.9	1.4	1.6	0.9	2.8
Mg	Invernal	145.5	85.2	220.5	212.3	200.3	117.7	319.4
	Estival	535.1	447.7	526.6	357.3	215.6	160.3	256.3
	inv/est	0.3	0.2	0.4	0.6	0.9	0.7	1.2
Al	Invernal	354.9	258.3	772.5	668.0	1449.4	396.6	2345.2
	Estival	408.9	443.8	603.5	1065.1	1156.4	723.7	1360.5
	inv/est	0.9	0.6	1.3	0.6	1.3	0.5	1.7
Si	Invernal	521.0	347.1	1292.2	1106.9	3355.4	799.2	5296.5
	Estival	632.2	887.3	1248.5	1756.0	2355.7	1368.9	2819.7
	inv/est	0.8	0.4	1.0	0.6	1.4	0.6	2.8
S	Invernal	304.0	231.0	450.4	609.9	855.1	417.6	1244.4
	Estival	682.8	558.3	721.6	884.4	814.7	503.8	848.7
	inv/est	0.4	0.4	0.6	0.7	1.0	0.8	1.5
Cl	Invernal	1363.9	800.0	2304.7	2111.3	96.7	213.5	517.0
	Estival	1028.2	511.4	1173.6	3577.1	230.7	453.0	713.2
	inv/est	1.3	1.6	2.0	0.6	0.4	0.5	0.7

La tabla continua en la siguiente página

Continuación de tabla anterior

Especie	Temporada	KC	Hualqui	UDT	Consultorio	Las Condes	Melipilla	Pudahuel
K	Invernal	439.1	475.5	577.9	555.1	519.9	230.2	995.7
	Estival	288.9	379.1	390.4	313.1	416.1	262.9	472.9
	inv/est	1.5	1.3	1.5	1.8	1.2	0.9	2.1
Ca	Invernal	282.8	136.6	619.9	1357.1	1914.6	219.9	2440.0
	Estival	331.6	356.4	625.1	1569.8	981.5	286.2	1041.1
	inv/est	0.9	0.4	1.0	0.9	2.0	0.8	2.3
Ti	Invernal	28.0	15.3	53.5	52.9	144.9	29.7	206.1
	Estival	35.0	43.7	57.9	70.4	83.5	46.1	91.5
	inv/est	0.8	0.4	0.9	0.8	1.7	0.6	2.3
V	Invernal	6.9	3.3	16.8	41.8	4.0	1.9	5.5
	Estival	10.9	11.9	19.7	49.6	2.5	2.3	2.7
	inv/est	0.6	0.3	0.9	0.8	1.6	0.8	2.0
Mn	Invernal	14.8	7.0	22.0	44.3	52.8	14.3	77.2
	Estival	12.9	14.4	18.9	31.7	29.8	18.2	28.6
	inv/est	1.1	0.5	1.2	1.4	1.8	0.8	2.7
Fe	Invernal	391.0	176.1	776.3	1418.3	2375.4	340.1	3009.9
	Estival	361.3	426.2	686.9	1136.5	1250.7	560.1	1169.9
	inv/est	1.1	0.4	1.1	1.2	1.9	0.6	2.5

La tabla continua en la siguiente página

Continuación de tabla anterior

Especie	Temporada	KC	Hualqui	UDT	Consultorio	Las Condes	Melipilla	Pudahuel
Cu	Invernal	11.5	7.0	18.1	14.8	81.6	11.8	95.1
	Estival	16.1	4.3	12.5	15.4	33.4	10.2	22.8
	inv/est	1.9	1.6	1.4	1.0	2.4	1.1	4.2
Zn	Invernal	24.2	10.1	39.1	117.3	97.0	7.7	169.1
	Estival	19.7	16.6	35.2	76.2	32.3	6.1	29.5
	inv/est	1.2	0.6	1.1	1.5	3.0	1.3	5.8
Br	Invernal	8.1	5.4	11.3	11.0	6.7	5.3	26.7
	Estival	5.0	4.3	17.1	13.4	6.8	5.5	8.5
	inv/est	1.6	1.2	0.7	0.8	1.0	1.0	3.1
Sr	Invernal	5.6	6.4	7.0	9.3	15.0	6.7	20.6
	Estival	3.4	3.1	5.2	10.5	11.1	7.5	10.3
	inv/est	1.6	2.0	1.3	0.9	1.3	0.9	2.0
Pb	Invernal	15.0	13.7	14.4	34.2	39.2	18.7	68.4
	Estival	4.3	4.6	4.4	17.8	16.7	12.6	17.3
	inv/est	3.5	3.0	3.3	1.9	2.3	1.5	4.0

### 3.1.1 Efecto Sitio sobre el MP<sub>2.5</sub> y sus especies

El análisis de FIC considera como niveles de concentración de referencia a las medidas en KC, es decir, todos los FIC presentados a continuación están calculados en base a las veces que sobrepasan los niveles de KC, o viceversa.

En la figura 3.2 se puede observar una alto FIC de MP<sub>10</sub> en UDT y Pudahuel, sobrepasando hasta dos veces al nivel de KC. Todos los sitios con FIC significativamente mayor que 1 (UDT, Consultorio, Las Condes y Pudahuel) corresponden a lugares más urbanizados, con impactos importantes de fuentes de tráfico vehicular y emisiones residenciales. En el caso de UDT y Consultorio, también se espera estar significativamente influenciado por las emisiones industriales. Por el contrario, Melipilla es el sitio que menos impacto presenta por MP<sub>10</sub>, obedeciendo a su característica de background rural (alejado de fuentes directas de emisión). Hualqui presenta valores de FIC similares a los de KC, indicando que un impacto equivalente de las fuentes de emisión predominantes en ambos sitios, y muy probablemente influido por la quema de leña residencial para calefacción.

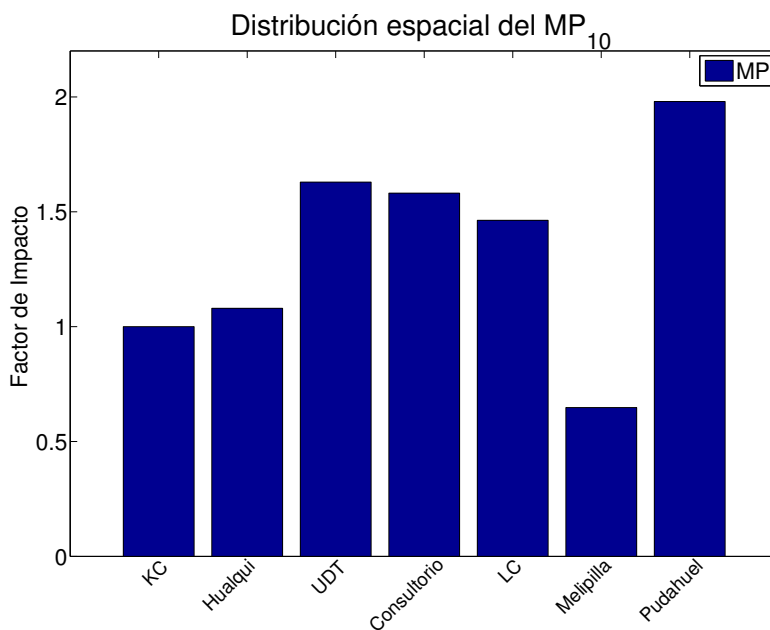
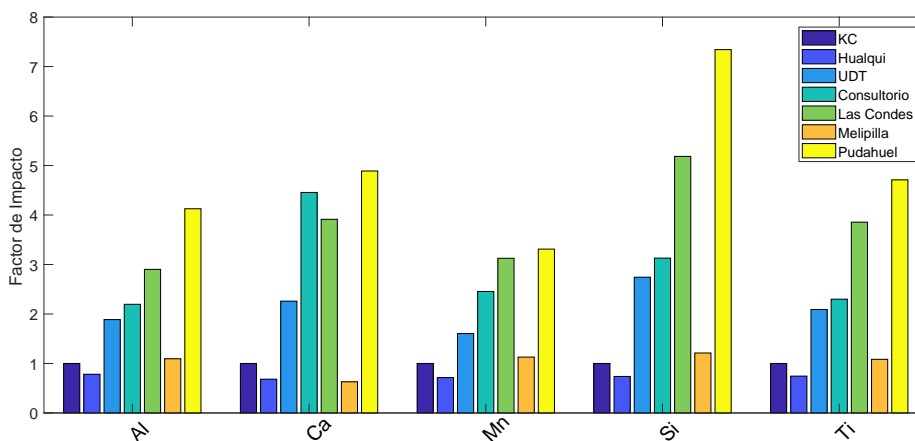


Figura 3.2. Distribución espacial de la masa del MP<sub>10</sub>

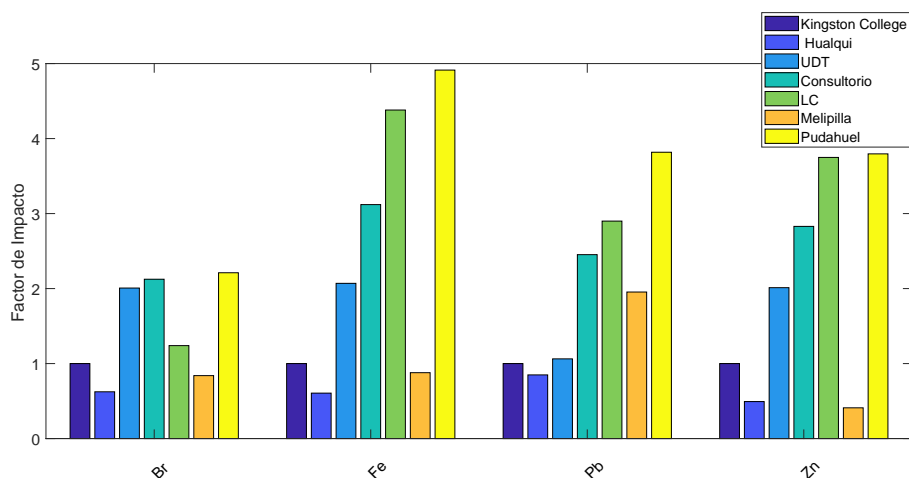
Las especies presentadas en la figura 3.3 generalmente han sido asociadas a elementos de la corteza terrestre (Achilleos, Wolfson, Ferguson, Kang, & Hadjimitsis, 2016), y por lo tanto se atribuyen preferentemente la resuspensión de polvo, o bien debido a actividades de construcción. En general se observan mayores valores FIC en los sitios urbanos de la RM respecto de los de la VIII Región. Este resultado es esperable considerando que el suelo está más frecuentemente

humedecido en la VIII en comparación con la RM, ya que el régimen de lluvias es diferente, y además Pudahuel presenta características de baja capacidad de ventilación local. Una excepción la presenta el Ca, y que se observan valores más altos en Consultorio y Pudahuel. En ambos sitios había actividades de construcción cercanas al momento de la campaña, por lo que el Ca puede ser utilizado como indicador de esta fuente emisora. El menor impacto lo tienen los sitios Hualqui y Melipilla, obedeciendo a la característica de estaciones background.



**Figura 3.3.** Comportamiento de especies del  $MP_{10}$  relacionadas a la corteza terrestre en los sitios de monitoreo

Las especies presentadas en la figura 3.4 provienen de emisiones de transporte vehicular, tanto del tubo de escape como desgastes mecánicos (Achilleos et al., 2016). Se observa que regionalmente el gradiente de concentración tiende a aumentar de sur a norte y se mantiene con factores sobresalientes en los sitios urbanos, al igual que para el caso anterior. Para el caso del plomo se observa que Melipilla, sitio background, sobrepasa las concentraciones referenciales, es decir, la estación background de Melipilla se encuentra con mayor impacto a este tipo de fuentes que un sitio urbano en Concepción.



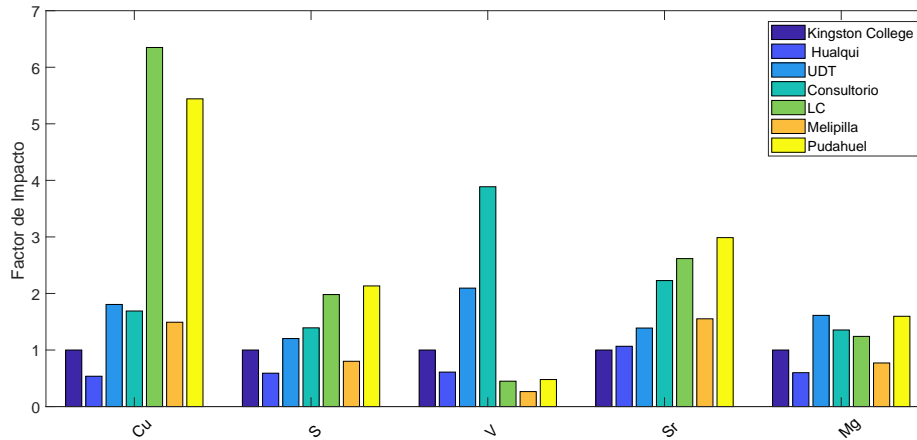
**Figura 3.4.** Comportamiento de especies relacionadas a las emisiones vehiculares en los sitios de monitoreo

Las especies presentadas en la figura 3.5 presentan varios comportamientos diferentes. En el caso del cobre se observa que la RM presenta altos factores de impacto en Pudahuel y Las Condes. Este resultado puede estar relacionado con el impacto preferente de las emisiones vehiculares, ya que el Cu también se considera como trazador de emisión vehicular de carácter mecánico (Viana et al., 2008).

El S y el Sr tienen a presentar el mismo gradiente espacial, con impactos el doblemente mayores en los sitios de la RM Las Condes y Pudahuel. Si bien, estos elementos han sido atribuidos a fuentes emisoras de emisiones mecánicas de carácter industrial como industrias del acero (Sr) (Oravisjärvi et al., 2003), ambos elementos parecen más bien estar indicando un impacto preferente de emisiones vehiculares mecánicas (desgaste de materiales y frenos) (Achilleos et al., 2016).

El V es el elemento que mejor refleja el impacto industrial, ya que está preferentemente asociado al uso de combustibles fósiles pesados (Karanasiou, Siskos, & Eleftheriadis, 2009). Alto impacto de esta especie se ve reflejado en los sitios Consultorio y UDT, los dos sitios más cercanos a fuentes industriales de tamaño significativo (industria acerera, Refinería de Petróleo y Centrales Termoeléctricas). El Mg también presenta un impacto de carácter antropogénico más bien relacionado con emisiones o industriales o bien, con emisiones de tráfico vehicular.

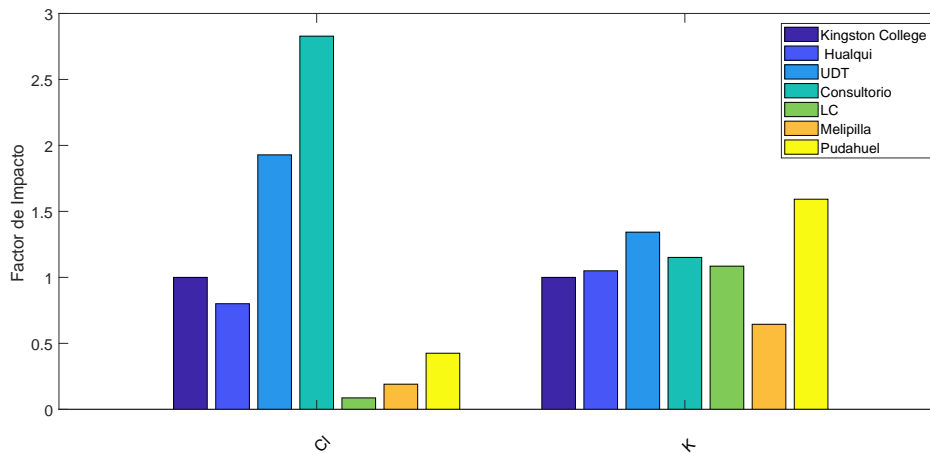




**Figura 3.5.** Comportamiento de especies relacionadas a emisiones industriales en los sitios de monitoreo

Las especies CI y K en el  $MP_{10}$  están presentadas en la figura 3.6 y pueden estar asociados a la presencia de aerosol marino y/o quema de biomasa, respectivamente. En el caso del CI se observa claramente el impacto de los sitios del sur por sobre el norte, especialmente en los sitios de Consultorio y UDT resultado congruente con la cercanía de estos sitios al mar.

Por otra parte el K presenta un factor de impacto similar en todos los sitios monitoreados debido al uso común de calefacción por leña, destacando Pudahuel y UDT como los sitios con mayores factores de impacto.



**Figura 3.6.** Comportamiento de especies relacionadas a Aerosol marino y quema de biomasa en los sitios de monitoreo

### 3.1.2 Efecto Temporada en el MP<sub>10</sub>

La tabla 3.2 presenta los resultados para el efecto de la temporada en la que se hicieron las mediciones. La temporada invernal fue elegida como referencia. 13 de las 17 especies entregan resultados estadísticamente significativos (valor P menor que 0.05), es decir, que el cambio de la temporada efectivamente impacta a la concentración. Las especies que más aumentan en Verano corresponden a Ti, S, Si, Mg, Fe, S, indicando impacto preferente de sales marinas y polvo resuspendido; mientras que las especies que más aumentan en invierno corresponden a MP<sub>10</sub>, Br, Cu, K, Pb, Sr, atribuido a tráfico vehicular y emisiones de calefacción preferentemente.

**Tabla 3.2.** *Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estándar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis de la variable Temporada para elementos del MP<sub>10</sub>, los valores destacados indican resultados estadísticamente significativos*

Efecto	Estimado	Desv. Std	Valor P	FI
Invernal	0.00	-	-	1.00
<b>Estival MP<sub>10</sub></b>	<b>-0.28</b>	<b>0.06</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>0.75</b>
Estival Al	0.18	0.09	0.063	1.19
Estival Br	-0.16	0.08	0.055	0.85
Estival Ca	0.14	0.11	0.213	1.15
Estival Cl	0.12	0.13	0.371	1.12
<b>Estival Cu</b>	<b>-0.52</b>	<b>0.06</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>0.6</b>
<b>Estival Fe</b>	<b>0.20</b>	<b>0.09</b>	<b>0.040</b>	<b>1.22</b>
<b>Estival K</b>	<b>-0.21</b>	<b>0.06</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>0.81</b>
<b>Estival Mg</b>	<b>0.49</b>	<b>0.08</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.63</b>
<b>Estival Mn</b>	<b>0.20</b>	<b>0.09</b>	<b>0.040</b>	<b>1.22</b>
<b>Estival Pb</b>	<b>-0.93</b>	<b>0.07</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>0.39</b>
<b>Estival S</b>	<b>0.37</b>	<b>0.06</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.44</b>
<b>Estival Si</b>	<b>0.34</b>	<b>0.14</b>	<b>0.016</b>	<b>1.40</b>
<b>Estival Sr</b>	<b>-0.44</b>	<b>0.06</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>0.64</b>
<b>Estival Ti</b>	<b>0.33</b>	<b>0.11</b>	<b>0.003</b>	<b>1.39</b>
<b>Estival V</b>	<b>0.20</b>	<b>0.09</b>	<b>0.040</b>	<b>1.22</b>
<b>Estival Zn</b>	<b>-0.26</b>	<b>0.10</b>	<b>0.009</b>	<b>0.77</b>

### 3.1.3 Evaluación del efecto meteorológico para el MP<sub>10</sub>

Las tablas 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 se presentan los distintos efectos que tienen las variables meteorológicas sobre las concentraciones de las especies. En cada tabla se presenta el valor estimado por el modelo, su desviación estándar y el parámetro estadístico P que indica la significancia estadística del resultado obtenido, resultados con valor P mayor a 0.05 deben interpretarse con prudencia.

De todos los parámetros meteorológicos, las precipitaciones (tabla 3.6) es la que más impacta con significancia estadística (valor P<0.05) tanto a la concentración MP<sub>10</sub> como a sus elementos. Es interesante destacar que la magnitud de la velocidad del viento impacta significativamente solo

a la concentración de MP<sub>10</sub> (a mayor velocidad menor concentración) y no a los elementos. A continuación se mostrarán los resultados detallados por variable.

La tabla 3.3 presenta los efectos de la humedad relativa sobre las especies, se consideraron los valores mayores al 70% de humedad como referenciales. Los resultados estadísticamente significativos de los FIC son para las especies MP<sub>10</sub>, Al, K, Cl, S, Si y Zn (aquellos solubles en agua). Se puede observar que para una humedad relativa menor al 70% las concentraciones pueden aumentar hasta un 84%.

**Tabla 3.3.** *Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estándar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis para la variable Humedad Relativa de elementos del MP<sub>10</sub>, los valores destacados indican resultados estadísticamente significativos*

Efecto	Estimado	Desv. Std	Valor P	FI
Humedad Relativa (HR>70%)	0.00	-	-	1.00
(HR<70%) MP <sub>10</sub>	0.11	0.07	0.100	1.11
<b>(HR&lt;70%) Al</b>	<b>0.33</b>	<b>0.11</b>	<b>0.004</b>	<b>1.39</b>
(HR<70%) Br	-0.04	0.10	0.653	0.96
(HR<70%) Ca	0.21	0.13	0.116	1.23
<b>(HR&lt;70%) Cl</b>	<b>0.61</b>	<b>0.20</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.84</b>
(HR<70%) Cu	-0.35	0.07	0.597	0.70
(HR<70%) Fe	-0.13	0.11	0.266	0.87
<b>(HR&lt;70%) K</b>	<b>0.19</b>	<b>0.07</b>	<b>0.007</b>	<b>1.20</b>
<b>(HR&lt;70%) Mg</b>	<b>-0.23</b>	<b>0.08</b>	<b>0.005</b>	<b>0.79</b>
(HR<70%) Mn	-0.13	0.11	0.266	0.87
(HR<70%) Pb	0.02	0.08	0.817	1.02
<b>(HR&lt;70%) S</b>	<b>-0.35</b>	<b>0.08</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>0.70</b>
<b>(HR&lt;70%) Si</b>	<b>0.39</b>	<b>0.16</b>	<b>0.019</b>	<b>1.47</b>
<b>(HR&lt;70%) Sr</b>	<b>0.19</b>	<b>0.07</b>	<b>0.008</b>	<b>1.20</b>
(HR<70%) Ti	0.17	0.13	0.184	1.18
(HR<70%) V	-0.13	0.11	0.266	0.87
<b>(HR&lt;70%) Zn</b>	<b>-0.26</b>	<b>0.10</b>	<b>0.009</b>	<b>0.77</b>

La tabla 3.4 indica el efecto que tiene la temperatura sobre la concentración de las especies, temperaturas mayores a 10°C fueron consideradas como referenciales, mientras que temperaturas inferiores se expresan como impactos en base a la referencia.

Los resultados del factor de impacto indican un claro aumento de las concentraciones cuando la temperatura ambiente en los sitios de medición disminuye a menos de 10°C, es una relación inversamente proporcional. Para el caso del MP<sub>10</sub> se observa que la concentración aumenta en un 29% y la mayor variación la presenta el Zn con un 44% de aumento. La variable temperatura presenta resultados significativamente estadísticos indicados por el valor de P.

Este resultado es congruente con estudios realizados en Santiago, donde se indica que las bajas temperaturas en conjunto con otras variables propician una estabilidad de la capa de inversión térmica a baja altura lo que provoca la acumulación de contaminantes (Garreaund & Rutllant, 2006).

**Tabla 3.4.** *Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estándar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis para la variable Temperatura de elementos del MP<sub>10</sub>, los valores destacados indican resultados estadísticamente significativos*

Efecto	Estimado	Desv. Std	Valor P	FI
Temperatura (T > 10 °C )	0.00	-	-	1.00
<b>(T &lt; 10 °C ) MP<sub>10</sub></b>	<b>0.26</b>	<b>0.06</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.29</b>
<b>(T &lt; 10 °C ) Al</b>	<b>0.28</b>	<b>0.10</b>	<b>0.008</b>	<b>1.32</b>
<b>(T &lt; 10 °C ) Br</b>	<b>0.23</b>	<b>0.09</b>	<b>0.013</b>	<b>1.25</b>
(T < 10 °C ) Ca	0.20	0.12	0.095	1.22
(T < 10 °C ) Cl	0.17	0.15	0.255	1.18
<b>(T &lt; 10 °C ) Cu</b>	<b>0.26</b>	<b>0.07</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.29</b>
<b>(T &lt; 10 °C ) Fe</b>	<b>0.21</b>	<b>0.10</b>	<b>0.050</b>	<b>1.23</b>
<b>(T &lt; 10 °C ) K</b>	<b>0.28</b>	<b>0.06</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.32</b>
(T < 10 °C ) Mg	<0.00	0.07	0.982	1.00
<b>(T &lt; 10 °C ) Mn</b>	<b>0.21</b>	<b>0.10</b>	<b>0.050</b>	<b>1.23</b>
(T < 10 °C ) Pb	0.03	0.07	0.732	1.03
(T < 10 °C ) S	0.08	0.07	0.260	1.08
<b>(T &lt; 10 °C ) Si</b>	<b>0.33</b>	<b>0.15</b>	<b>0.033</b>	<b>1.39</b>
(T < 10 °C ) Sr	0.01	0.07	0.790	1.01
<b>(T &lt; 10 °C ) Ti</b>	<b>0.29</b>	<b>0.07</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.44</b>
<b>(T &lt; 10 °C ) V</b>	<b>0.37</b>	<b>0.12</b>	<b>0.002</b>	<b>1.23</b>
<b>(T &lt; 10 °C ) Zn</b>	<b>0.29</b>	<b>0.11</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.44</b>

La tabla 3.5 indica el efecto de la rapidez del viento ( $|V|$ ) sobre las concentraciones de especies. La rapidez del viento tiene una incidencia directa en la capacidad de ventilación de las ciudades, ya que dispersan los contaminantes acumulados. Los factores de impacto obtenidos para cada especie indican a modo general que la concentración disminuye a medida que aumenta la rapidez del viento, particularmente, el MP<sub>10</sub> disminuye en un 23%, sin embargo, el Cl, relacionado con aerosol marino, llega a aumentar un 24%.

Los resultados obtenidos no tienen significancia estadística según el valor P, por lo que los resultados deben ser interpretados con precaución.

**Tabla 3.5.** Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estandar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis para la variable rapidez del viento para los elementos del MP<sub>10</sub>, los valores destacados indican resultados estadísticamente significativos

Efecto	Estimado	Desv. Std	Valor P	FI
Rapidez de Viento ( $ V  < 0.8$ m/s)	0.00	-	-	1.00
<b>(<math>0.8 \leq  V  &lt; 1.6</math> m/s)MP<sub>10</sub></b>	<b>-0.25</b>	<b>0.11</b>	<b>0.030</b>	<b>0.77</b>
<b>(<math> V  \geq 1.6</math> m/s) MP<sub>10</sub></b>	<b>-0.25</b>	<b>0.12</b>	<b>0.040</b>	<b>0.77</b>
( $0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Al	-0.05	0.19	0.773	0.95
( $ V  \geq 1.6$ m/s) Al	-0.07	0.20	0.720	0.93
( $0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Br	-0.08	0.15	0.596	0.92
( $ V  \geq 1.6$ m/s) Br	-0.27	0.16	0.102	0.76
( $0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Ca	-0.16	0.22	0.465	0.85
( $ V  \geq 1.6$ m/s) Ca	-0.11	0.23	0.627	0.89
( $0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Cl	-0.20	0.26	0.445	0.81
( $ V  \geq 1.6$ m/s) Cl	0.22	0.28	0.428	1.24
( $0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Cu	-0.20	0.13	0.121	0.81
( $ V  \geq 1.6$ m/s) Cu	-0.18	0.13	0.178	0.83
( $0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Fe	0.09	0.19	0.619	1.09
( $ V  \geq 1.6$ m/s) Fe	-0.10	0.20	0.615	0.90
( $0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) K	-0.20	0.12	0.087	0.81
( $ V  \geq 1.6$ m/s) K	-0.24	0.12	0.064	0.78
( $0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Mg	-0.04	0.15	0.762	0.96
( $ V  \geq 1.6$ m/s) Mg	0.03	0.15	0.805	1.03
( $0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Mn	0.09	0.19	0.619	1.09
( $ V  \geq 1.6$ m/s) Mn	0.09	0.19	0.619	1.09
( $0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Pb	-0.23	0.14	0.117	0.79
( $ V  \geq 1.6$ m/s) Pb	-0.16	0.15	0.290	0.85
( $0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) S	-0.16	0.13	0.203	0.85
( $ V  \geq 1.6$ m/s) S	-0.20	0.14	0.146	0.81
( $0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Si	-0.25	0.27	0.358	0.77
( $ V  \geq 1.6$ m/s) Si	-0.40	0.29	0.175	0.67
( $0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Sr	0.16	0.11	0.168	1.17
( $ V  \geq 1.6$ m/s) Sr	0.07	0.12	0.557	1.07
( $0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Ti	-0.04	0.21	0.836	0.96
( $ V  \geq 1.6$ m/s) Ti	-0.18	0.23	0.438	0.83
( $0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) V	0.09	0.19	0.619	1.09
( $ V  \geq 1.6$ m/s) V	-0.10	0.20	0.615	0.90
( $0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Zn	-0.16	0.19	0.407	0.85
( $ V  \geq 1.6$ m/s) Zn	-0.20	0.21	0.327	0.81

La tabla 3.6 indica el efecto de las precipitaciones en la concentración de las diferentes especies. Precipitaciones sobre 1 [mm] se establecieron como referenciales debido a que bajo esta condición existe una despreciable disminución de la concentración de contaminantes (Kim, Hong, Jun, Park, & Sunwoo, 2014), mientras que los efectos de precipitaciones menores a 1 [mm] se expresaron en base a la referencia.

Los factores de impacto para esta variable presentan diferencias más notorias, para el MP<sub>10</sub> la concentración aumenta un 43% cuando no hay precipitaciones respecto de cuando hay, llegando a un 185% para el Si. Estos resultados son significativos estadísticamente según indica el valor P, y

son esperados puesto que la lluvia es el agente limpiador más efectivo de la atmósfera, ya que precipita al suelo las partículas suspendidas y disuelve diversos tipos de contaminantes.

**Tabla 3.6.** *Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estándar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis de la variable Precipitaciones para los elementos del MP<sub>10</sub>, los valores destacados indican resultados estadísticamente significativos*

Efecto	Estimado	Desv. Std	Valor P	FI
Precipitaciones (PP > 1mm)	0.00	-	-	1.00
<b>(PP &lt; 1mm) MP<sub>10</sub></b>	<b>0.36</b>	<b>0.06</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.43</b>
<b>(PP &lt; 1mm) Al</b>	<b>0.69</b>	<b>0.11</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.99</b>
<b>(PP &lt; 1mm) Br</b>	<b>0.28</b>	<b>0.09</b>	<b>0.004</b>	<b>1.32</b>
<b>(PP &lt; 1mm) Ca</b>	<b>0.67</b>	<b>0.13</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.95</b>
<b>(PP &lt; 1mm) Cl</b>	<b>-0.38</b>	<b>0.15</b>	<b>0.016</b>	<b>0.68</b>
(PP < 1mm) Cu	0.12	0.08	0.141	1.12
<b>(PP &lt; 1mm) Fe</b>	<b>0.56</b>	<b>0.11</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.75</b>
<b>(PP &lt; 1mm) K</b>	<b>0.36</b>	<b>0.07</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.43</b>
(PP < 1mm) Mg	<-0.01	0.09	0.966	0.97
<b>(PP &lt; 1mm) Mn</b>	<b>0.56</b>	<b>0.11</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.75</b>
(PP < 1mm) Pb	<-0.01	0.09	< 0.995	0.99
<b>(PP &lt; 1mm) S</b>	<b>0.64</b>	<b>0.07</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.89</b>
<b>(PP &lt; 1mm) Si</b>	<b>1.05</b>	<b>0.16</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>2.85</b>
(PP < 1mm) Sr	0.12	0.07	0.104	1.12
<b>(PP &lt; 1mm) Ti</b>	<b>0.72</b>	<b>0.13</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>2.05</b>
<b>(PP &lt; 1mm) V</b>	<b>0.56</b>	<b>0.11</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.75</b>
<b>(PP &lt; 1mm) Zn</b>	<b>0.52</b>	<b>0.12</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.68</b>

La tabla 3.7 muestra los principales efectos analizados en esta sección y con resultados estadísticamente significativos sobre las variables. Se encontró que la precipitación es el agente limpiador más efectivo ya que en ausencia de esta la concentración aumenta hasta un 43% en el caso del MP<sub>10</sub>. También se observa que el aumento en la magnitud del viento disminuye un 23% la concentración de MP<sub>10</sub> en la atmósfera.

Se puede resumir que la configuración meteorológica que propicia el aumento de las concentraciones debe presentar temperaturas menores a 10°C, vientos menores a 0.6 [m/s] considerados como calmas y ausencia de precipitaciones.

Los factores meteorológicos presentados son de escala local, y generan condiciones de estabilidad atmosférica que llevan a una ventilación poco eficaz, dominando las bajas temperaturas, ausencia de precipitación y baja velocidad de vientos, propiciando episodios de contaminación.

**Tabla 3.7. Efectos sobre las especies significativamente estadísticas**

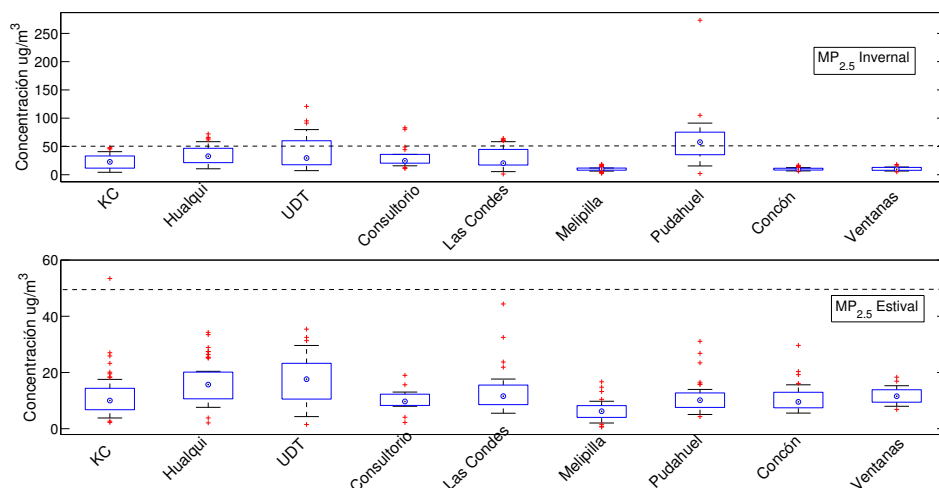
Elemento	Temporada Estival	HR<70%	T< 10°C	V >1.6 [m/s]	PP >1[mm]
MP <sub>10</sub>	0.75	-	1.29	0.77	1.43
Al	-	1.39	1.32	-	1.99
Br	-	-	1.25	-	1.32
Ca	-	-	-	-	1.95
Cl	-	1.84	-	-	0.68
Cu	0.60	-	1.29	-	-
Fe	-	-	1.23	-	1.75
K	0.81	1.20	1.32	-	1.43
Mg	1.63	0.79	-	-	-
Mn	-	-	1.23	-	1.75
Pb	0.39	-	-	-	-
S	1.44	0.70	-	-	1.89
Si	1.40	1.47	1.39	-	2.85
Sr	0.64	1.20	-	-	-
Ti	1.39	-	1.44	-	2.05
V	1.22	-	1.23	-	1.75
Zn	0.77	0.77	1.44	-	1.68

### 3.2 Variación temporal y espacial del MP<sub>2.5</sub> sus especies

La figura 3.7 muestra la distribución de concentración de MP<sub>2.5</sub> para cada uno de los 9 sitios, el gráfico también incluye la norma diaria decretada por el ministerio de medio ambiente (50 [ug/m<sup>3</sup>]), mostrada en una línea punteada. Se observa que en época invernal el rango de variación de la concentración es superior a 200 [ug/m<sup>3</sup>], y que la norma es ampliamente sobrepasada en Pudahuel y UDT, mientras que KC, Hualqui, Consultorio y Las Condes se encuentran muy cercanos a la norma diaria.

Es claramente visible el patrón general entre temporadas, aumentando los niveles de concentración para todos los sitios en invierno y disminuyendo en verano, manteniendo a Melipilla como aquel sitio menos impactado, al igual que en el caso del MP<sub>10</sub>

Las concentraciones más bajas obtenidas son en Melipilla en Verano, debido a que es un lugar poco impactado por tráfico y/o emisiones industriales directas, no así para el caso de Pudahuel y UDT, sitios que se encuentran altamente expuestos a importantes avenidas y sectores industriales, respectivamente.



**Figura 3.7.** Distribución espacial diaria durante ambas temporadas para el material particulado fino, incluyendo la norma máxima en la línea punteada

En la tabla 3.8 se entrega el detalle de la concentración promedio de  $MP_{2.5}$  y su composición elemental separados por temporada. Es posible ver que las concentraciones promedio varían significativamente para cada sitio y para cada temporada.

Al igual que para el  $MP_{10}$ , se ha utilizado el coeficiente Invernal/Estival (Inv/Est) como un indicador del comportamiento de las especies durante las distintas temporadas.

Con respecto a la variación de las concentraciones por temporada, la razón entre las temporadas puede variar desde 0.9 en Concón y Ventanas indicando que en ambas temporadas se observan similares valores en las concentraciones, hasta 5.2 en Pudahuel, lo que indica que en invierno se observan valores hasta 5 veces más altos que en verano.

Además, algunas especies presentan predominancia en época estival, como el Mg, Al, Si, Ca, Fe y S, los primeros elementos se asocian al polvo en suspensión, mientras que el azufre se asocia a sulfatos de emisiones industriales. Por otra parte, las especies V, Cu, Br, Zn, Pb, Cl y K presentan aumento de sus niveles en época invernal, estos elementos se relacionan con emisiones industriales, vehiculares, aerosol marino y quema de biomasa.



**Tabla 3.8.** *tabla especies MP<sub>2,5</sub>*

Elementos	Categoría	KC	Hualqui	UDT	Consultorio	Las Condes	Melipilla	Pudahuel	Concón	Quintero	Ventanas
MP <sub>10</sub>	Invernal	23.3	35.5	40.1	32.4	28.6	10.2	59.7	10.0	-	10.5
	Estival	11.9	16.5	17.2	10.1	13.4	6.6	11.3	11.0	9.7	11.7
	inv/est	1.9	2.1	2.3	3.1	2.1	1.5	5.2	0.9	-	0.8
Mg	Invernal	61.5	55.7	67.3	73.9	69.3	63.5	71.0	80.2	-	87.8
	Estival	603.1	565.3	581.2	126.4	67.3	65.2	73.7	140.3	91.0	86.1
	inv/est	0.1	0.1	0.1	0.5	1.0	0.9	0.9	0.5	-	1.0
Al	Invernal	60.2	57.4	76.6	90.9	232.9	60.1	160.3	130.6	-	51.2
	Estival	171.3	85.6	85.6	106.5	109.6	84.2	80.9	496.9	95.2	164.0
	inv/est	0.4	0.7	0.9	0.9	2.1	0.7	2.0	0.3	-	0.3
Si	Invernal	30.5	19.3	67.5	69.0	436.7	28.5	255.4	188.4	-	69.8
	Estival	251.4	73.3	89.2	150.7	146.2	70.4	82.2	922.4	132.9	259.7
	inv/est	0.1	0.3	0.8	0.5	3.0	0.4	3.1	0.2	-	0.3
S	Invernal	220.4	189.8	312.0	412.8	656.6	378.7	1026.0	525.0	-	477.8
	Estival	554.9	478.9	570.5	545.4	669.1	437.7	683.0	931.3	832.9	903.4
	inv/est	0.4	0.4	0.5	0.8	1.0	0.9	1.5	0.6	-	0.5
Cl	Invernal	232.6	334.4	548.6	626.8	31.5	13.8	398.1	313.1	-	306.0
	Estival	256.2	118.1	160.3	716.8	18.8	33.0	26.8	795.4	165.2	356.8
	inv/est	0.9	2.8	3.4	0.9	1.7	0.4	14.9	0.4	-	0.9

Continuación de tabla anterior

Elementos	Categoría	KC	Hualqui	UDT	Consultorio	Las Condes	Melipilla	Pudahuel	Concón	Quintero	Ventanas
K	Invernal	348.3	401.5	399.0	416.6	237.1	143.1	515.8	122.6	-	113.3
	Estival	209.2	256.0	232.9	93.5	178.5	84.7	167.3	189.1	64.5	126.2
	inv/est	1.7	1.6	1.7	4.5	1.3	1.7	3.1	0.6	-	0.9
Ca	Invernal	16.3	8.7	34.6	86.4	272.1	11.0	125.5	68.1	-	38.5
	Estival	90.8	39.6	67.5	148.0	73.0	16.7	35.9	348.2	45.3	72.1
	inv/est	0.2	0.2	0.5	0.6	3.7	0.7	3.5	0.2	-	0.5
V	Invernal	4.0	2.0	6.7	18.9	2.2	1.7	2.4	3.4	-	15.8
	Estival	7.6	4.6	9.9	31.4	1.6	1.8	1.5	7.0	12.0	19.3
	inv/est	0.5	0.4	0.7	0.6	1.4	0.9	1.6	0.5	-	0.8
Fe	Invernal	66.3	13.1	88.9	306.7	461.2	13.6	365.1	111.1	-	45.0
	Estival	107.2	42.6	96.1	132.6	105.8	33.1	52.0	600.6	80.2	148.3
	inv/est	0.6	0.3	0.9	2.3	0.4	0.4	7.0	0.2	-	0.3
Cu	Invernal	8.4	7.6	8.7	10.1	31.1	8.6	41.0	18.3	-	51.6
	Estival	4.8	4.0	6.0	14.1	11.6	9.5	11.6	30.3	43.5	42.0
	inv/est	1.8	1.9	1.5	0.7	2.7	0.9	3.5	0.6	-	1.2
Br	Invernal	8.4	7.6	8.7	10.1	31.1	8.6	41.1	6.2	-	3.6
	Estival	4.8	4.0	6.0	14.4	11.6	9.5	11.6	6.7	3.3	4.7
	inv/est	1.8	1.9	1.5	0.7	2.7	0.9	3.5	0.9	-	0.8

La tabla continua en la siguiente página

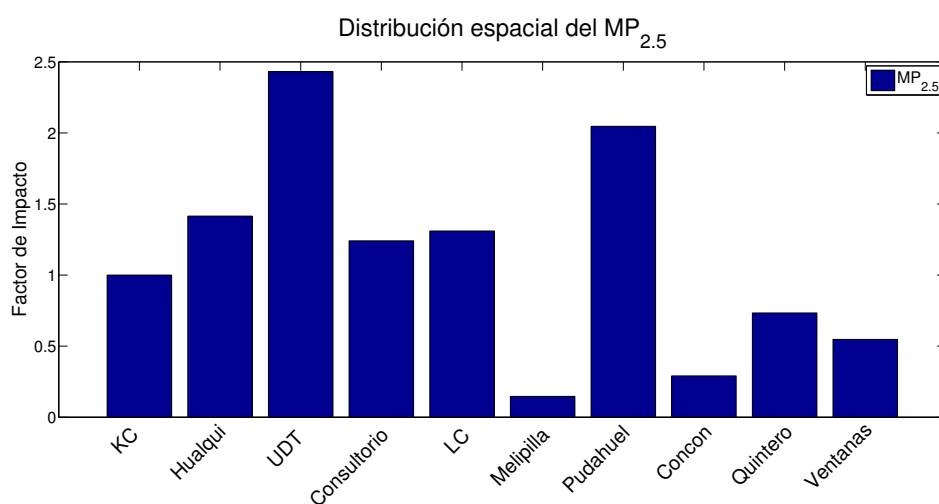
Continuación de tabla anterior

Elementos	Categoría	KC	Hualqui	UDT	Consultorio	Las Condes	Melipilla	Pudahuel	Concón	Quintero	Ventanas
Zn	Invernal	20.5	8.8	22.4	89.4	45.8	6.9	93.4	23.6	-	43.4
	Estival	15.0	13.0	20.1	56.0	13.9	5.8	13.8	27.4	32.7	21.6
	inv/est	1.4	0.7	1.1	1.6	3.3	1.2	6.8	0.9	-	2.0
Pb	Invernal	14.5	16.1	16.6	27.9	30.1	18.3	62.7	15.8	-	35.4
	Estival	4.3	5.2	3.7	18.6	15.7	14.2	14.8	17.3	34.0	18.2
	inv/est	3.4	3.1	4.5	1.5	1.9	1.3	4.2	0.9	-	1.9

### 3.2.1 Efecto Sitio del MP<sub>2.5</sub> y sus especies

El análisis de FIC para MP<sub>2.5</sub> considera como niveles de concentración de referencia a las medidas en KC, es decir, todos los FIC presentados a continuación están calculados en base a las veces que sobrepasan los niveles de KC, o viceversa.

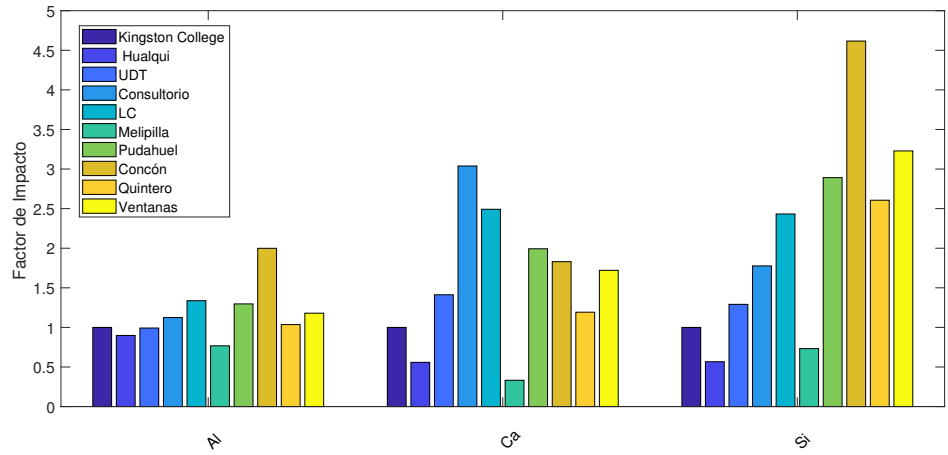
De la figura 3.8, se puede observar que los FIC más altos se presentan en UDT y Pudahuel, sobrepasando en más de 2 veces. Los sitios menos afectados son los de la V región y Melipilla, considerada estación background en la RM. También se observa que los sitios del sur presentan FIC que doblan las concentraciones de la Quinta Región. Es importante señalar que pese a que Hualqui se describió como una estación background rural, ésta igualmente se encuentra significativamente impactada por MP<sub>2.5</sub>.



**Figura 3.8.** Distribución espacial del material particulado fino

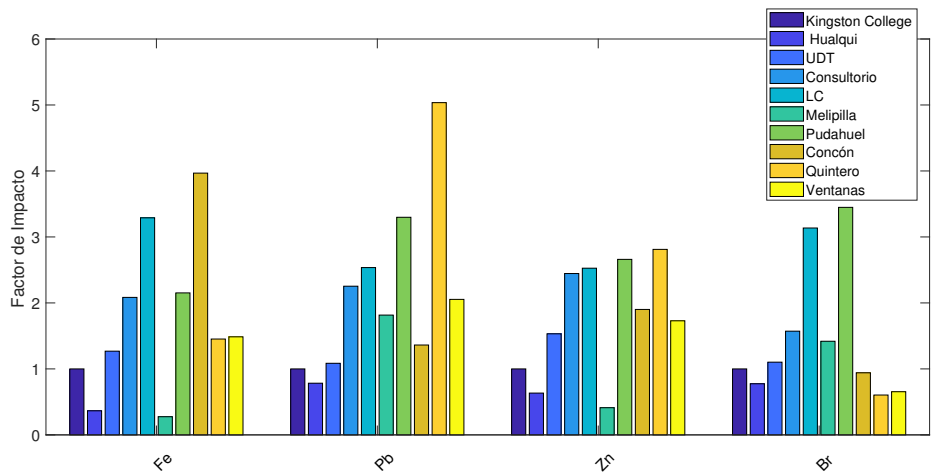
La figura 3.9 presenta los FIC de especies que se relacionan con emisiones de desgaste de superficies. El Al, Ca y Si son elementos térreos que provienen de la re suspensión del polvo por desgaste de la superficie terrestre (Achilleos et al., 2016). Se puede observar que los FIC más altos se presentan en Concón (FIC > 3), sin embargo, en general se tiene un factor de impacto similar en todos los sitios urbanos .

La figura 3.10 muestra los FIC para Fe, Pb, Zn y Br. En la literatura estos elementos han sido ampliamente atribuidos a impacto por tráfico vehicular (Viana et al., 2008), pero pueden provenir de emisiones de escape o bien de resuspensión del polvo. Por ejemplo, el Fe tiene un comportamiento similar al de los elementos de la figura 3.9 por lo que está atribuido principalmente a



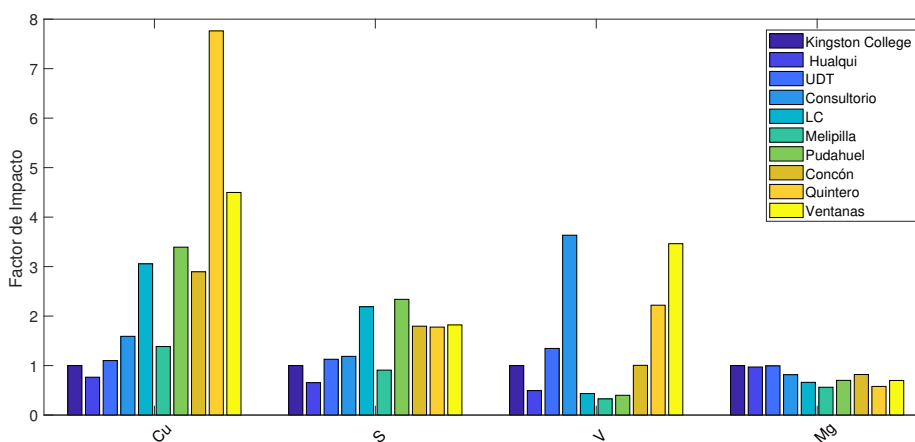
**Figura 3.9.** Comportamiento de especies relacionadas a las emisiones terrestres en los sitios de monitoreo

la resuspensión del polvo. El Br parece ser el elemento más directamente relacionado con las emisiones vehiculares de escape, ya que los mayores valores de FIC se dan en Pudahuel y Las Condes, donde se espera que el tráfico vehicular sea más intenso. Los sitios menos impactados son Hualqui y Melipilla.



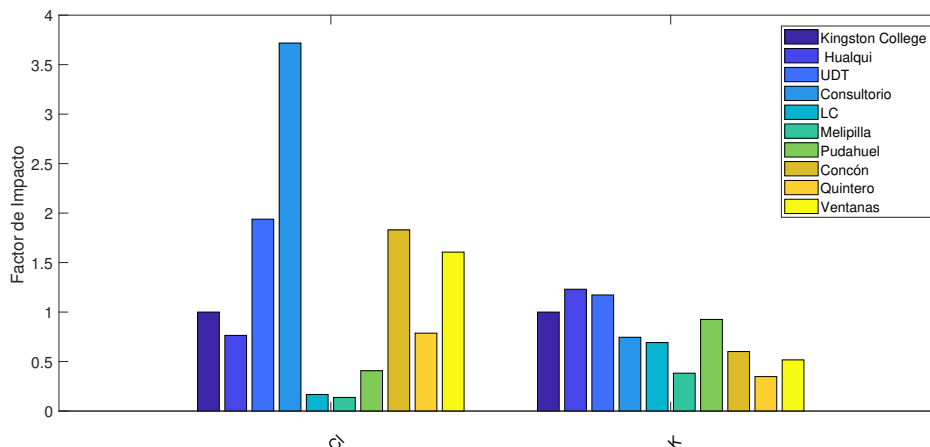
**Figura 3.10.** Comportamiento de especies relacionadas a las emisiones vehiculares en los sitios de monitoreo

La figura 3.11 muestra las especies que en estudios anteriores han sido relacionadas con emisiones industriales (Kavouras, Koutrakis, Cereceda, & Oyola, 2001). Sin embargo, de todos ellos, el V es el elemento que mejor refleja el impacto industrial debido al uso de combustibles fósiles. Se encuentra un impacto industrial en Consultorio, UDT (VIII Región) y Ventanas y Quintero (V Región). El Cu obtiene valores especialmente altos en Quintero y Ventanas, indicando un impacto industrial de la refinería Codelco, sin embargo, también hay valores altos en Pudahuel y Las Condes, y en este caso el impacto preferente es por transporte vehicular. El S presenta menor variabilidad espacial, sin embargo indica el impacto de partículas particularmente envejecidas (sulfato), y puede reflejar mejor la capacidad de acumulación de contaminación que tienen los sitios de Las Condes y Pudahuel frente a las otras. Finalmente el Mg es el que menor variabilidad espacial presenta entre los sitios.



**Figura 3.11.** Comportamiento de especies relacionadas a las emisiones industriales en los sitios de monitoreo

La figura 3.12 se entregan los FICs de Cl y K, e indican la presencia de 2 fuentes emisoras. La primera es el aerosol marino que se relaciona con la presencia de Cl. Esta fuente se observa con un alto impacto en la Quinta y Octava Región lo que es congruente debido a que los sitios de monitoreo se encuentran muy próximos al océano. Por otra parte el K se relaciona con la quema de biomasa, recurso utilizado principalmente como calefacción domiciliaria. Esta fuente presenta un claro gradiente de norte a sur.



**Figura 3.12.** Comportamiento de especies relacionadas a las emisiones marinas y de biomasa en los sitios de monitoreo

### 3.2.2 Efecto Temporada

La tabla 3.9 muestra que las concentraciones de especies tienen un comportamiento estacional, algunas dominan en época estival y otras en época invernal. En particular el  $MP_{2.5}$ , Br, Cl, Cu, K, Pb, y Zn presentan mayores concentraciones en invierno, mientras que las otras en verano.

**Tabla 3.9.** *Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estándar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis para la variable Temporada de elementos del MP<sub>2.5</sub>, los valores destacados indican resultados estadísticamente significativos*

Efecto	Estimado	Desv. Std	Valor P	FI
Invernal	0.00	-	-	1.00
<b>Estival MP<sub>2.5</sub></b>	<b>-0.54</b>	<b>0.06</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>0.58</b>
<b>Estival Al</b>	<b>0.23</b>	<b>0.07</b>	<b>0.016</b>	<b>1.25</b>
<b>Estival Br</b>	<b>-0.36</b>	<b>0.06</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>0.69</b>
<b>Estival Ca</b>	<b>0.38</b>	<b>0.09</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.46</b>
<b>Estival Cl</b>	<b>-0.34</b>	<b>0.14</b>	<b>0.014</b>	<b>0.71</b>
<b>Estival Cu</b>	<b>-0.34</b>	<b>0.08</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>0.71</b>
Estival Fe	0.04	0.11	0.676	1.04
<b>Estival K</b>	<b>-0.39</b>	<b>0.06</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>0.67</b>
<b>Estival Mg</b>	<b>0.52</b>	<b>0.07</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.68</b>
<b>Estival Pb</b>	<b>-0.66</b>	<b>0.08</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>0.51</b>
<b>Estival S</b>	<b>0.47</b>	<b>0.06</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.59</b>
<b>Estival Si</b>	<b>0.37</b>	<b>0.10</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.44</b>
<b>Estival V</b>	<b>0.26</b>	<b>0.08</b>	<b>0.001</b>	<b>1.29</b>
<b>Estival Zn</b>	<b>-0.31</b>	<b>0.10</b>	<b>0.001</b>	<b>0.73</b>

### 3.2.3 Efecto Meteorológico

Acorde con los valores de significancia estadística (valor  $P < 0.05$ ), y al igual que en el caso del MP<sub>10</sub> las variables meteorológicas que más impactan en la concentración de MP<sub>2.5</sub> y sus especies corresponden a las precipitaciones mostradas en la tabla 3.13, seguido de la humedad relativa presentada en la tabla 3.10. El detalle se presenta a continuación.

La tabla 3.10 presenta el efecto de la Humedad Relativa sobre la concentración de las especies. Se obtuvieron resultados estadísticamente significativos para el Br, Cl, Mg, S y Zn. Para estos elementos se observa que para una humedad relativa menor a 70 °C la concentración disminuye, sin embargo al no ser significativamente estadístico para el MP<sub>2.5</sub> no se considera como agente influyente.



**Tabla 3.10.** *Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estándar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis para la variable Humedad Relativa de elementos del MP<sub>2.5</sub>, los valores destacados indican resultados estadísticamente significativos*

Efecto	Estimado	Desv. Std	Valor P	FI
Humedad Relativa (HR>70%)	0.00	-	-	1.00
(HR<70%) MP <sub>2.5</sub>	-0.06	0.06	0.374	0.94
(HR<70%) Al	0.04	0.07	0.605	1.04
<b>(HR&lt;70%) Br</b>	<b>-0.16</b>	<b>0.06</b>	<b>0.019</b>	<b>0.85</b>
(HR<70%) Ca	-0.07	0.10	0.474	0.93
<b>(HR&lt;70%) Cl</b>	<b>-0.14</b>	<b>0.16</b>	<b>0.001</b>	<b>0.86</b>
(HR<70%) Cu	-0.11	0.08	0.202	0.89
(HR<70%) Fe	-0.19	0.12	0.117	0.82
(HR<70%) K	< -0.01	0.07	0.948	0.99
<b>(HR&lt;70%) Mg</b>	<b>-0.20</b>	<b>0.07</b>	<b>0.008</b>	<b>0.81</b>
(HR<70%) Pb	-0.03	0.08	0.674	0.97
<b>(HR&lt;70%) S</b>	<b>-0.44</b>	<b>0.07</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>0.64</b>
(HR<70%) Si	0.04	0.11	0.670	1.04
(HR<70%) V	-0.11	0.09	0.209	0.89
<b>(HR&lt;70%) Zn</b>	<b>-0.44</b>	<b>0.11</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>0.64</b>

Para la tabla 3.11 se muestra el efecto de la temperatura sobre la concentración de las especies. Se obtuvieron resultados estadísticamente significativos para el MP<sub>2.5</sub>, Cl, Mg y Zn. Para estos elementos se observa que a temperaturas menores que 10 °C, la concentración llega a aumentar desde un 32 a un 66%.

**Tabla 3.11.** *Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estándar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis para la variable Humedad Relativa de elementos del MP<sub>2.5</sub>*

Efecto	Estimado	Desv. Std	Valor P	FI
Temperatura (T > 10 °C)	0.00	-	-	1.00
<b>(T &lt; 10 °C) MP<sub>2.5</sub></b>	<b>0.29</b>	<b>0.06</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.33</b>
(T < 10 °C) Al	0.07	0.07	0.316	1.07
(T < 10 °C) Br	0.09	0.07	0.161	1.09
(T < 10 °C) Ca	-0.06	0.11	0.543	0.94
<b>(T &lt; 10 °C) Cl</b>	<b>0.51</b>	<b>0.15</b>	<b>0.001</b>	<b>1.66</b>
(T < 10 °C) Cu	0.11	0.08	0.216	1.11
(T < 10 °C) Fe	0.10	0.13	0.431	1.10
(T < 10 °C) K	0.29	0.07	0.698	1.33
<b>(T &lt; 10 °C) Mg</b>	<b>-0.10</b>	<b>0.07</b>	<b>0.008</b>	<b>0.90</b>
(T < 10 °C) Pb	0.08	0.08	0.339	1.08
(T < 10 °C) S	0.12	0.07	0.080	1.12
(T < 10 °C) Si	0.15	0.11	0.157	1.16
(T < 10 °C) V	0.07	0.09	0.406	1.07
<b>(T &lt; 10 °C) Zn</b>	<b>0.28</b>	<b>0.11</b>	<b>0.014</b>	<b>1.32</b>

La tabla 3.12 muestra el efecto de la magnitud del viento sobre la concentración de las especies. Se obtuvieron resultados estadísticamente significativos para MP<sub>2.5</sub>, Cl y Pb. Se observa que

la concentración de estas especies disminuye en hasta en un 40% con magnitudes de viento superiores a 1.6 [m/s].

**Tabla 3.12.** *Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estandar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis para la variable Magnitud del viento para los elementos del MP<sub>2.5</sub>, los valores destacados indican resultados estadísticamente significativos*

Efecto	Estimado	Desv. Std	Valor P	FI
Rapidez de Viento ( $ V  < 0.8$ m/s)	0.00	-	-	1.00
$(0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s)MP <sub>2.5</sub>	-0.18	0.10	0.086	0.83
<b>(<math> V  \geq 1.6</math> m/s) MP<sub>2.5</sub></b>	<b>-0.31</b>	<b>0.11</b>	<b>0.007</b>	<b>0.73</b>
$(0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Al	0.21	0.12	0.081	1.23
$( V  \geq 1.6$ m/s) Al	0.05	0.13	0.689	1.05
$(0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Br	-0.11	0.10	0.291	0.89
$( V  \geq 1.6$ m/s) Br	-0.13	0.11	0.268	0.87
$(0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Ca	0.12	0.16	0.441	1.12
$( V  \geq 1.6$ m/s) Ca	-0.10	0.18	0.590	0.90
$(0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Cl	-0.67	0.24	0.445	0.51
<b>(<math> V  \geq 1.6</math> m/s) Cl</b>	<b>-0.50</b>	<b>0.27</b>	<b>0.006</b>	<b>0.60</b>
$(0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Cu	-0.10	0.13	0.431	0.90
$( V  \geq 1.6$ m/s) Cu	-0.15	0.15	0.303	0.86
$(0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Fe	0.27	0.20	0.174	1.30
$( V  \geq 1.6$ m/s) Fe	-0.22	0.22	0.304	0.80
$(0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) K	0.04	0.11	0.698	1.04
$( V  \geq 1.6$ m/s) K	-0.10	0.12	0.391	0.90
$(0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Mg	0.01	0.11	0.898	1.01
$( V  \geq 1.6$ m/s) Mg	-0.05	0.13	0.652	0.95
$(0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Pb	-0.26	0.13	0.052	0.77
<b>(<math> V  \geq 1.6</math> m/s) Pb</b>	<b>-0.34</b>	<b>0.15</b>	<b>0.023</b>	<b>0.71</b>
$(0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) S	-0.11	0.13	0.323	0.89
$( V  \geq 1.6$ m/s) S	-0.20	0.12	0.108	0.81
$(0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Si	0.17	0.18	0.342	1.18
$( V  \geq 1.6$ m/s) Si	-0.01	0.20	0.947	0.99
$(0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) V	0.08	0.13	0.549	1.08
$( V  \geq 1.6$ m/s) V	-0.11	0.15	0.468	0.89
$(0.8 \leq  V  < 1.6$ m/s) Zn	0.22	0.17	0.202	1.24
$( V  \geq 1.6$ m/s) Zn	0.01	0.19	0.958	0.99

La tabla 3.13 presenta los efectos de la precipitación en la concentración de las especies. Se obtienen resultados estadísticamente significativos para todas las especies excepto para el Br, Cl, Cu y Pb. Para las demás especies se obtiene que en presencia de precipitaciones menores a 1 [mm] (Kim et al., 2014) las concentraciones de las especies aumentan en hasta e un 103% en comparación a un día con precipitaciones mayores a 1 [mm].

**Tabla 3.13.** *Parámetros de Efecto, valor estimado, desviación estándar, valor P y factor de impacto obtenidos del análisis de la variable Precipitaciones para los elementos del MP<sub>2.5</sub>, los valores destacados indican resultados estadísticamente significativos*

Efecto	Estimado	Desv. Std	Valor P	FI
Precipitaciones (PP > 1mm)	0.00	-	-	1.00
<b>(PP &lt; 1mm) MP<sub>2.5</sub></b>	<b>0.54</b>	<b>0.07</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.71</b>
<b>(PP &lt; 1mm) Al</b>	<b>0.32</b>	<b>0.09</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.37</b>
(PP < 1mm) Br	0.12	0.08	0.155	1.12
<b>(PP &lt; 1mm) Ca</b>	<b>0.47</b>	<b>0.12</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.59</b>
(PP < 1mm) Cl	0.06	0.17	0.711	1.06
(PP < 1mm) Cu	0.11	0.10	0.294	1.11
<b>(PP &lt; 1mm) Fe</b>	<b>0.55</b>	<b>0.14</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.73</b>
<b>(PP &lt; 1mm) K</b>	<b>0.44</b>	<b>0.08</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.55</b>
<b>(PP &lt; 1mm) Mg</b>	<b>0.26</b>	<b>0.09</b>	<b>0.007</b>	<b>1.29</b>
(PP < 1mm) Pb	0.13	0.10	0.182	1.13
<b>(PP &lt; 1mm) S</b>	<b>0.71</b>	<b>0.07</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>2.03</b>
<b>(PP &lt; 1mm) Si</b>	<b>0.45</b>	<b>0.13</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.56</b>
<b>(PP &lt; 1mm) V</b>	<b>0.26</b>	<b>0.10</b>	<b>0.013</b>	<b>1.29</b>
<b>(PP &lt; 1mm) Zn</b>	<b>0.54</b>	<b>0.12</b>	<b>&lt; 0.001</b>	<b>1.71</b>

La tabla 3.14 muestra los principales efectos sobre el MP<sub>2.5</sub> y con resultados estadísticamente significativos sobre las variables. Se encontró que la precipitación, al igual que para el MP<sub>10</sub>, es el agente limpiador más efectivo ya que en ausencia de esta la concentración aumenta hasta un 71% en el caso del MP<sub>2.5</sub>. También se observa que el aumento en la magnitud del viento disminuye la concentración de las especies.

Se puede resumir que la configuración meteorológica que propicia el aumento de las concentraciones debe presentar temperaturas menores a 10°C, magnitudes de viento consideradas como calmas y ausencia de precipitaciones.

**Tabla 3.14.** Efectos sobre las especies significativamente estadísticos

Elemento	Temporada Estival	HR<70%	T< 10°C	V >1.6 [m/s]	PP <1[mm]
MP <sub>10</sub>	0.58	-	1.33	0.73	1.71
Al	1.25	-	-	-	1.37
Br	0.69	0.85	-	-	-
Ca	1.46	-	-	-	1.59
Cl	0.71	0.86	1.66	0.60	-
Cu	0.71	-	-	-	-
Fe	-	-	-	-	1.73
K	0.67	-	-	-	1.55
Mg	1.68	1.19	0.90	-	1.29
Pb	0.51	-	-	0.71	-
S	1.59	0.64	-	-	2.03
Si	1.44	-	-	-	1.56
V	1.29	-	-	-	1.29
Zn	0.73	0.77	1.32	-	1.71

### 3.3 Identificación de fuentes

Para elaborar esta sección se utilizó la herramienta EPA PMF 5.0 descrita en la sección 2.4. Se evaluaron soluciones consistentes con varios números de fuentes y los respectivos test de estabilidad descritos en la sección 2.4. La solución seleccionada se escogió en base a aquella que arroje un resultado físicamente explicable.

En los análisis mediante EPA PMF, las soluciones base que entregaron resultados más interpretables fueron seleccionados de un test de diferentes números de fuentes y 20 corridas aleatorias para el modelo. Las incertidumbres asociadas a los factores encontrados fueron testeadas con 100 corridas de bootstrap basadas en las solución base.

#### 3.3.1 Región Metropolitana - MP<sub>10</sub>

Para los sitios de la Región Metropolitana se corrieron entre 6 y 3 factores soluciones, encontrando 5 y 4 factores como número máximo de factores físicamente explicables.

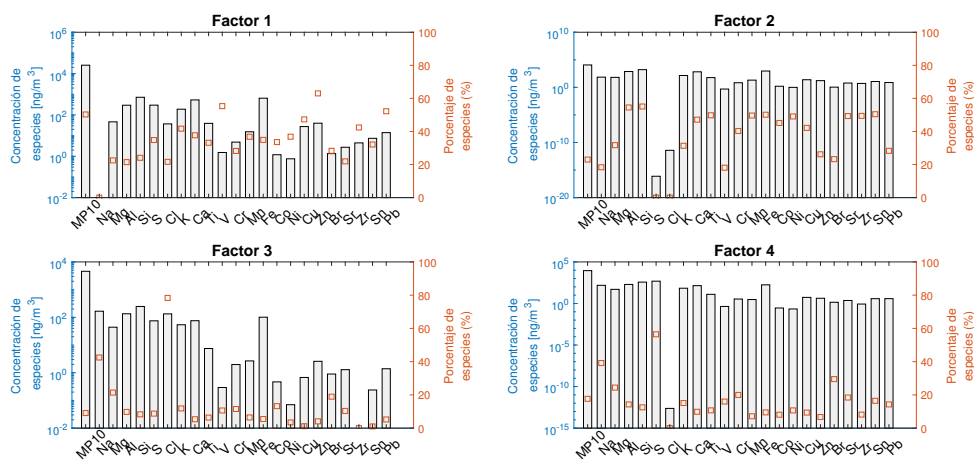
Una solución estable de 4 fuentes fue encontrada para Las Condes, y se presentan en la figura 3.13. Se observó una buena correlación entre el modelo predictivo y lo observado para la masa del MP<sub>10</sub> ( $R^2 = 0.94$ ). El Q teórico y robusto mostraron un 21% de diferencia.

- (i). El primer factor observado en la figura 3.13 fue identificado como emisiones por quema de biomasa debido a la abundancia de la especie K (Kavouras et al., 2001). Este perfil también contiene una importante proporción de Cu, Zn y Pb relacionados a emisiones vehiculares. La quema de biomasa es usada principalmente para calefacción domiciliaria, lo que queda

respaldado por constante comportamiento de la fuente en los meses de invierno y su drástica disminución en verano.

- (ii). El segundo factor se asocia a polvo suspendido de ciudad por la predominancia de las especies Al, Si, Ca, Ti, Mn y Fe.
- (iii). El tercer factor se asocia a presencia de aerosol marino por la alta contribución de Cl y Na principalmente, seguido por la presencia de Mg que también se asocia a esta fuente en sitios de carácter urbano especialmente en la fracción respirable  $MP_{10}$  (Viana et al., 2008). Analizando su comportamiento temporal, este factor aumenta en los meses estivales y disminuye en los meses invernales, lo que se relaciona con la capacidad de ventilación de la cuenca.
- (iv). Finalmente el último factor se asocia a emisiones de sulfatos por la abundante presencia de la especie S y en menor medida Na. Estudios previos (Querol et al., 1998) han identificado que los sulfatos son especies envejecidas en las masas de aire producidas por la lenta oxidación del  $SO_2$ . Esta molécula es emitida a la atmósfera por industrias del carbón y refinerías.

La serie de tiempo complementaria al perfil de factores de la solución se presenta en la sección 3.4 de anexos.



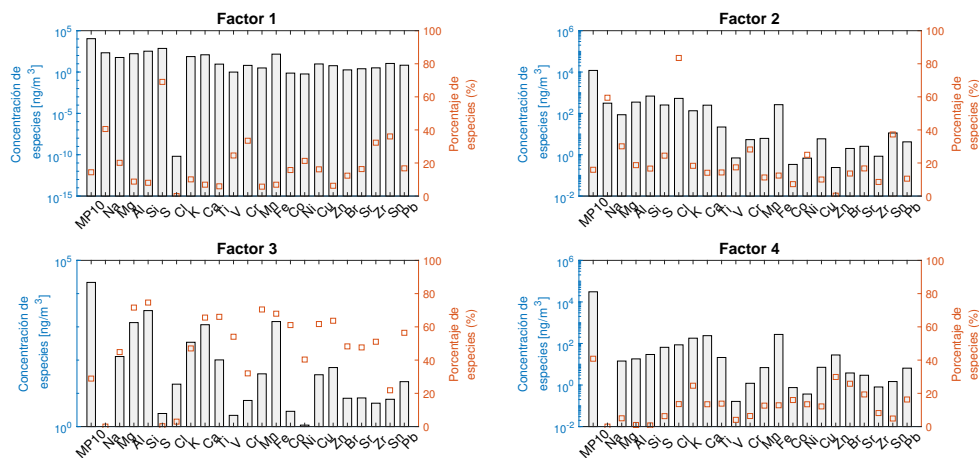
**Figura 3.13.** Factores modelados para una configuración de 4 fuentes en Las Condes

Una solución estable de 4 fuentes fue encontrada para Pudahuel  $MP_{10}$ , como se muestra en la figura 3.14. Se observó una excelente correlación entre el modelo predictivo y lo observado para la

masa del  $MP_{10}$  ( $R^2 = 0.99$ ). El Q teórico y robusto mostraron un 11% de diferencia.

- (i). El primer factor observado en la figura 3.14 se relaciona con sulfatos por la presencia de S y Na, como ya se mencionó este sulfato proviene de la oxidación del  $SO_2$  (Querol et al., 1998) y está mezclado con Na debido a las reacciones del ácido sulfúrico con las sales marinas (Achilleos et al., 2016).
- (ii). El segundo factor se indica la presencia de aerosol marino por la presencia de los elementos traza Cl, Na y en menor proporción Mg (Manousakas et al., 2017). La sal marina es comúnmente identificada en como una fuente del  $MP_{10}$ . (Viana et al., 2008)(Achilleos et al., 2016).
- (iii). El tercer factor se relaciona con polvo re-suspendido y quema de biomasa por la presencia de las especies Al, Si, Ca, Ti, Mn y Fe. El polvo re-suspendido proviene del desgaste de la superficie terrestre, ya que las especies asociadas a esta fuente son los principales componentes de la corteza terrestre (Viana et al., 2008) (Kavouras et al., 2001).
- (iv). El cuarto factor se asocia principalmente a emisiones vehiculares por la presencia de Cu, Br, Zn y Pb. Estas emisiones tienen relación con el desgaste de frenos, embragues y neumáticos (Khan, Hirano, & Masunaga, 2012) y también posee una alta contribución de la especie K relacionada a la quema de biomasa.

La serie de tiempo complementaria al perfil de factores de la solución se presenta en la sección 3.4 de anexos.

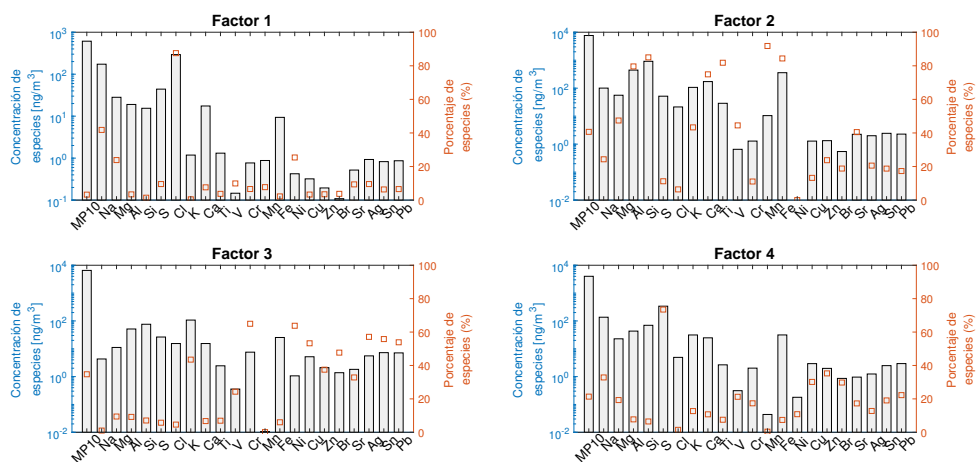


**Figura 3.14.** Factores modelados para una configuración de 4 fuentes en Pudahuel

Una solución de 4 factores fue encontrada para Melipilla. Se observó una excelente correlación entre el modelo predictivo y lo observado para la masa del  $MP_{10}$  ( $R^2 = 0.96$ ). El Q teórico y robusto mostraron un 25% de diferencia.

- (i). El primer factor presentado en la figura 3.15 se relaciona con la presencia de aerosol marino por la predominancia de las especies Cl, Na y Mg este último en menor proporción (Manousakas et al., 2017) (Chand et al., 2010)
- (ii). El segundo factor se asocia con polvo re-suspendido (Kavouras et al., 2001) debido a la presencia de Al, Si, Ca, Ti, Mn y Fe. Estas especies son propias de la corteza terrestre y se emiten a la atmósfera por procesos mecánicos del desgaste de superficies.
- (iii). El tercer factor se relaciona con quema de biomasa por la presencia de su principal trazador K, además viene acompañado por las especies Fe, Ni, Br y Pb las que se asocian a emisiones vehiculares (Viana et al., 2008), este acople ha sido reportado en otros estudios hechos en Chile (Kavouras et al., 2001).
- (iv). Finalmente el cuarto factor se asocia con sulfatos por la presencia de S y Na. Como ya se explicó para los casos anteriores, el sulfato proviene de la oxidación de  $SO_2$  (Querol et al., 1998) y en ocasiones se presenta junto con la especie Na proveniente de sal marina (Achilleos et al., 2016)

La serie de tiempo complementaria al perfil de factores de la solución se presenta en la sección de anexos.



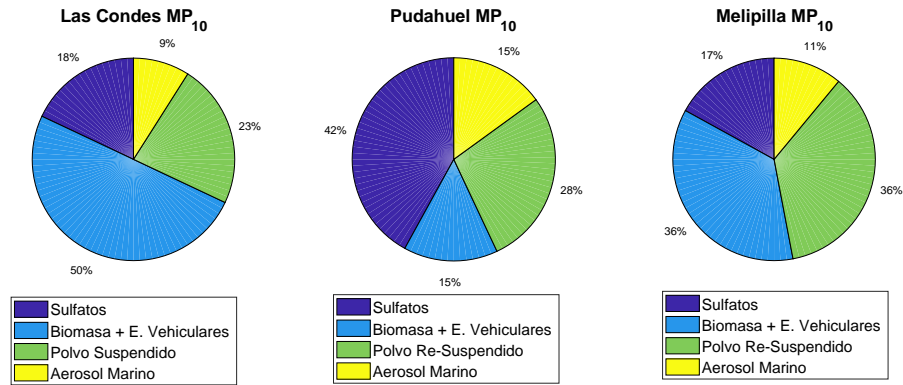
**Figura 3.15.** Factores modelados para una configuración de 5 fuentes en Melipilla

En la figura 3.16 se puede observar que el factor común encontrado entre los 3 sitios es la contribución de aerosol marino, donde las especies clave con el cloro y el sodio Cl, Na (Viana et al., 2008). Esta fuente emisora es consecuencia del movimiento de las masas de aire desde la costa hacia la cuenta. Otro de los factores comunes es el polvo en suspensión asociado a las especies aluminio, silicio, calcio y titanio, elementos presentes en la corteza terrestre (Achilleos et al., 2016). También se observa el factor asociado a emisiones industriales donde se encuentran las especies vanadio y níquel, principalmente. Existe también la presencia de un factor denominado sulfatos, asociado a los elementos azufre y sodio, estos elementos se asocian a un transporte de del sulfato producido por la oxidación del  $\text{SO}_2$  industrial (Querol et al., 1998) mezclado con sales marinas (Achilleos et al., 2016), puesto que en Santiago no se encuentra un fuente directa de azufre. La fuente de emisiones vehiculares se asocia a las especies plomo, bromo, fierro, cobre y zinc, el estos se deben al desgaste de las pastillas de frenos, al desgaste de los neumáticos y emisiones del tubo de escape (Achilleos et al., 2016). Otro de los factores encontrados es producto de la quema de biomasa asociado a la presencia de potasio, principal trazador de combustión de leña (Kavouras et al., 2001). Aparecen los aerosoles marinos en cada uno de los sitios, y se observa que la contribución de Aerosol-Pudahuel es mayor que Aerosol-Melipilla y a su vez esta última es mayor que Aerosol-Las Condes.

También aparecen otros metales en suspensión como el Cu, Mn, Sr, Zr. El Mn siempre aparece como especie que aporta a la fuente de polvo natural suspendido, el polvo suspendido y los



sulfatos locales se encuentran en similares proporciones en los 3 sitios. Melipilla es el sitio más impactado por quema de biomasa, seguido por Pudahuel (aunque se encuentra acoplado al polvo re-suspendido), y finalmente Las Condes. Además Melipilla también es el sitio menos impactado por emisiones industriales.



**Figura 3.16.** Porcentaje de contribución de fuentes al MP<sub>10</sub> en los sitios de la RM

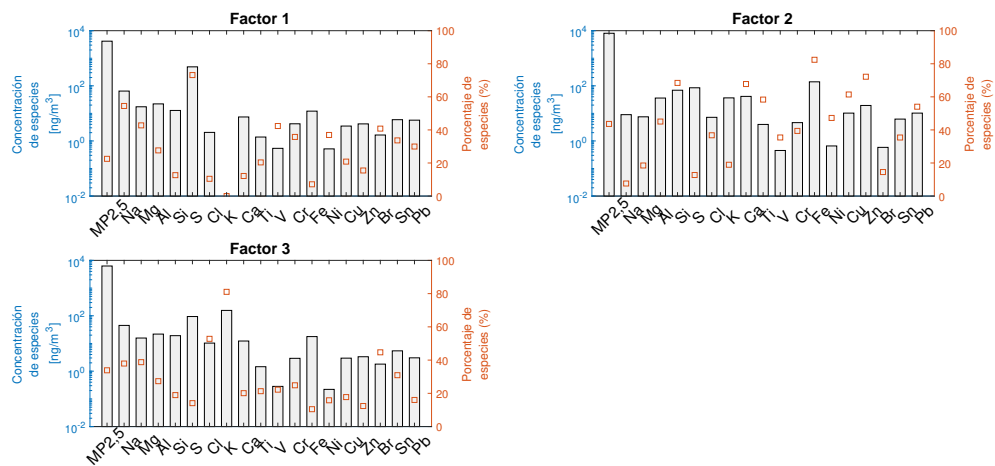
### 3.3.2 Región Metropolitana - MP<sub>2.5</sub>

Para los elementos de la fracción fina muestreados en los sitios de la Región Metropolitana se corrieron soluciones considerando entre 6 y 3 factores soluciones, encontrando 3 y 4 factores como número máximo de factores físicamente explicables.

Una solución de 3 factores fue encontrada para Las Condes se observó una buena correlación entre el modelo predictivo y lo observado para la masa del MP<sub>2.5</sub> ( $R^2 = 0.85$ ). El Q teórico y robusto mostraron un 22% de diferencia.

- (i). El primer factor que se observa en la figura 3.17 se relaciona con sulfatos debido a la presencia de S y Na, esta última en menor proporción. Estudios previos han evidenciado la formación de sulfatos por la oxidación del SO<sub>2</sub> (Querol et al., 1998), y en algunos casos se presenta junto con los aerosoles marinos (Achilleos et al., 2016).
- (ii). El segundo factor se ha atribuido al impacto mezclado de dos fuentes, el polvo re-suspendido y emisiones vehiculares por la presencia de Al, Si, Ca y Ti, y Fe, Cu, Zn y Pb respectivamente (Viana et al., 2008) (Achilleos et al., 2016). Estas fuentes son propias de sitios urbanizados.
- (iii). Finalmente el tercer factor se asocia a quema de biomasa por la presencia de K, y Cl en menor medida. La quema de biomasa es comúnmente usada como fuente de calefacción domiciliaria, y el Cl aparece cuando ésta se quema junto con desechos plásticos. (Manousakas et al., 2017).

La serie de tiempo complementaria al perfil de factores de la solución se presenta en la sección 3.4 de anexos.

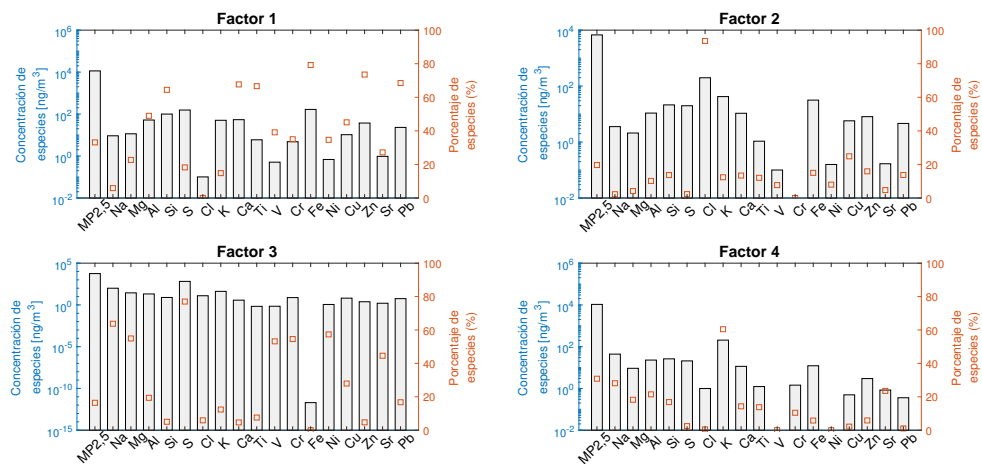


**Figura 3.17.** Factores modelados para una configuración de 3 fuentes en Las Condes

Una solución de 4 factores fue seleccionada para Pudahuel  $MP_{2.5}$ . Se observó una excelente correlación entre el modelo predictivo y lo observado para la masa del  $MP_{2.5}$  ( $R^2 = 0.99$ ). El Q teórico y robusto mostraron un 5% de diferencia.

- (i). El primer factor que se observa en la figura 3.18 se asocia a polvo re-suspendido y emisiones vehiculares por la presencia de las especies Al, Si, Ca y Ti, y Fe, Cu, Zn y Pb respectivamente (Viana et al., 2008)(Achilleos et al., 2016), al igual que se mencionó para Las Condes estas fuentes son típicas de sitios urbanizados.
- (ii). El segundo factor tiene como especie predominante al Cl, se denominará cloro local.
- (iii). El tercer factor se asocia a sulfatos envejecidos, producidos por la lenta oxidación de  $SO_2$  (Querol et al., 1998) y su mezcla con sal marina Na (Achilleos et al., 2016).
- (iv). El cuarto factor se relaciona con la quema de biomasa debido a la presencia dominante de K (Kavouras et al., 2001), este recurso ampliamente usado como calefacción domiciliaria tanto en sitios urbanos como rurales.

La serie de tiempo complementaria al perfil de factores de la solución se presenta en la sección 3.4 de anexos.

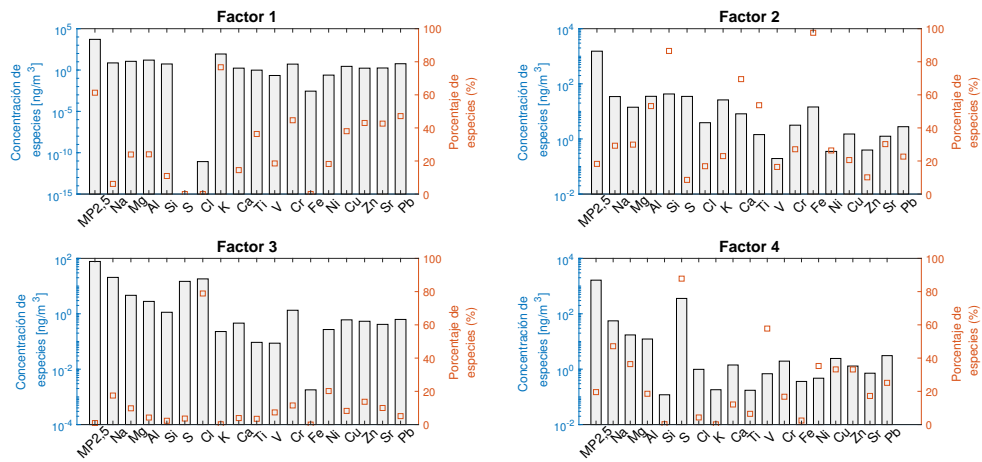


**Figura 3.18.** Factores modelados para una configuración de 4 fuentes en Pudahuel

Una solución de 4 factores se seleccionó para Melipilla. Se observó una excelente correlación entre el modelo predictivo y lo observado para la masa del  $MP_{2.5}$  ( $R^2 = 0.90$ ). El Q teórico y robusto mostraron un 28% de diferencia.

- (i). El primer factor que se observa en la figura 3.19 se asocia a la quema de biomasa por la presencia dominante de la especie K (Kavouras et al., 2001), este recurso ampliamente usado como calefacción domiciliar tanto en sitios urbanos como rurales. También se observa la presencia de metales como Cu, Cr y Pb asociados a esta fuente.
- (ii). El segundo factor se asocia a polvo re-suspendido, debido a la presencia de las especies Al, Si, Ca, Ti y Fe (Achilleos et al., 2016).
- (iii). El tercer factor se asocia a la presencia de aerosol marino debido a las especies Cl y Na. Para la fracción fina Melipilla es el único sitio donde se observa el factor de aerosol marino.
- (iv). El cuarto factor se relaciona con emisiones industriales, principalmente sulfatos S (Querol et al., 1998) y productos de refinerías como V, Ni y Cu (Viana et al., 2008).

La serie de tiempo complementaria al perfil de factores de la solución se presenta en la sección 3.4 de anexos.



**Figura 3.19.** Factores modelados para una configuración de 4 fuentes en Melipilla

La figura 3.20, para el material particulado fino la cantidad de factores que contribuyen al MP se pueden cuantificar entre 3 y 4 para cada sitio, ya que las configuraciones para 5 fuentes no resultaron satisfactorias. En general, los 3 sitios se encuentran impactados por quema de biomasa asociados a la especie K, emisiones industriales asociados a las especies V, Ni, S y Cu, y polvo re-suspendido asociado a especies provenientes de la corteza terrestre como Al, Si, Ca y Ti principalmente. Melipilla se encuentra mayormente impactado por emisiones de quema de biomasa en comparación a las otras 2 estaciones, lo que es esperable en un sitio alejado de la ciudad. También presenta una pequeña fracción de aporte de aerosoles marinos. Pudahuel es el sitio mayormente afectado por emisiones industriales y además es el único sitio que presenta aportes de cloro. Las Condes presenta mayormente aportes por quema de biomasa y polvo en suspensión, dos fuentes características de sectores urbanos (Achilleos et al., 2016) (Viana et al., 2008).

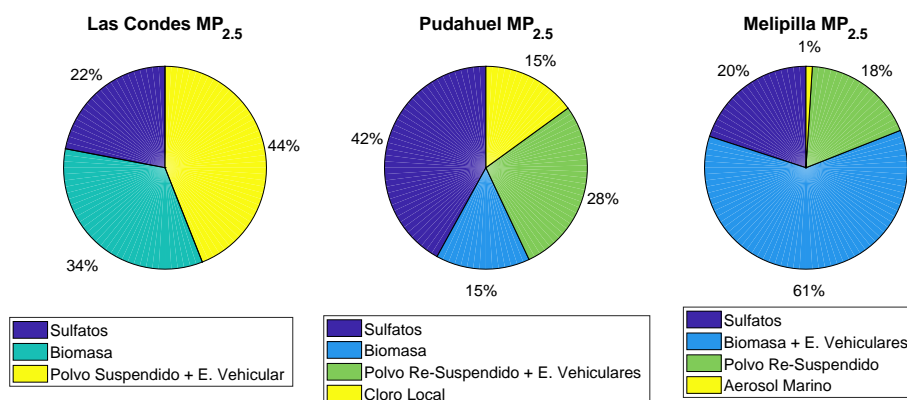


Figura 3.20. Porcentaje de contribución de fuentes al MP<sub>2.5</sub> en los sitios de la RM

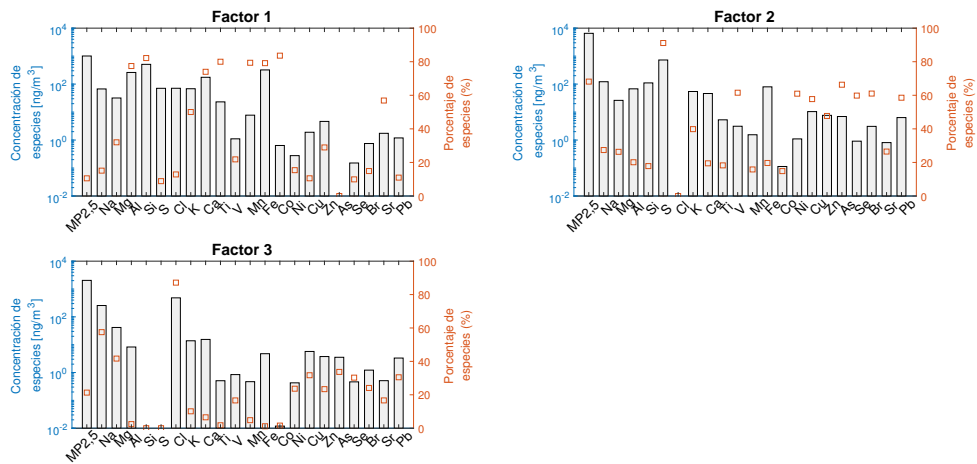
### 3.3.3 Puchuncaví - Quintero - Concón - MP<sub>2.5</sub>

Para los sitios de la Quinta Región se corrieron entre 6 y 3 factores soluciones, encontrando 5 y 4 factores como número máximo de factores físicamente explicables.

Una solución de 3 factores fue encontrada para Concón. Se observó una buena correlación entre el modelo predictivo y lo observado para la masa del MP<sub>2.5</sub> ( $R^2 = 0.71$ ). El Q teórico y robusto mostraron un 39% de diferencia.

- (i). El primer factor presentado en la figura 3.21 se relaciona con el polvo re-suspendido por la presencia de las especies Al, Si, Ca, Ti, Mn y Fe (Achilleos et al., 2016). Se encuentra, además, aportes significativos de K, por lo que este factor se encuentra mezclado con la quema de biomasa (Kavouras et al., 2001).
- (ii). El segundo factor se asocia a emisiones industriales. La especie S se forma por la oxidación de SO<sub>2</sub> (Querol et al., 1998), y V, Ni y Cu relacionados con las refinerías de petróleo y cobre (Viana et al., 2008), y finalmente As, Se y Br especies comúnmente aceptadas como trazadores de combustión de carbón (Khan et al., 2012) (Harrison, Smith, & Luhana, 1996).
- (iii). El tercer factor se relaciona con la presencia de aerosol marino debido a las especies dominantes Cl, Na y en menor proporción Mg (Viana et al., 2008).

La serie de tiempo complementaria al perfil de factores de la solución se presenta en la sección 3.4 de anexos.

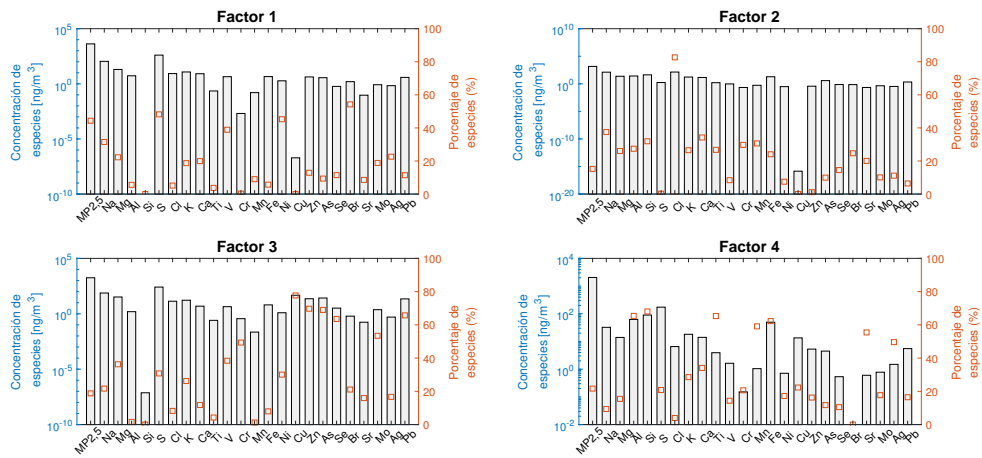


**Figura 3.21.** Factores modelados para una configuración de 3 fuentes en Concepción

Se encontró una solución estable de 4 factores para Quintero. Se observó una buena correlación entre el modelo predictivo y lo observado para la masa del  $MP_{2.5}$  ( $R^2 = 0.63$ ). El Q teórico y robusto mostraron un 20% de diferencia.

- (i). El primer factor presentado en la figura 3.22 se relaciona con emisiones industriales S, Br, V, Ni emisiones de industrias de fundición y refinerías de petróleo (Viana et al., 2008) (Kavouras et al., 2001).
- (ii). El segundo factor se atribuye a la presencia de aerosol marino por la dominancia de Cl y Na.
- (iii). El tercer factor se asocia con emisiones industriales derivadas de la industria del carbón y fundiciones de cobre por la presencia de especies As y Se (Khan et al., 2012) (Harrison et al., 1996), y Pb, Cu, Mo y Zn (Kavouras et al., 2001)
- (iv). El cuarto factor se relaciona con el polvo re-suspendido por la presencia de las especies A, Si, Ti, Mn y Fe (Achilleos et al., 2016).

La serie de tiempo complementaria al perfil de factores de la solución se presenta en la sección 3.4 de anexos.

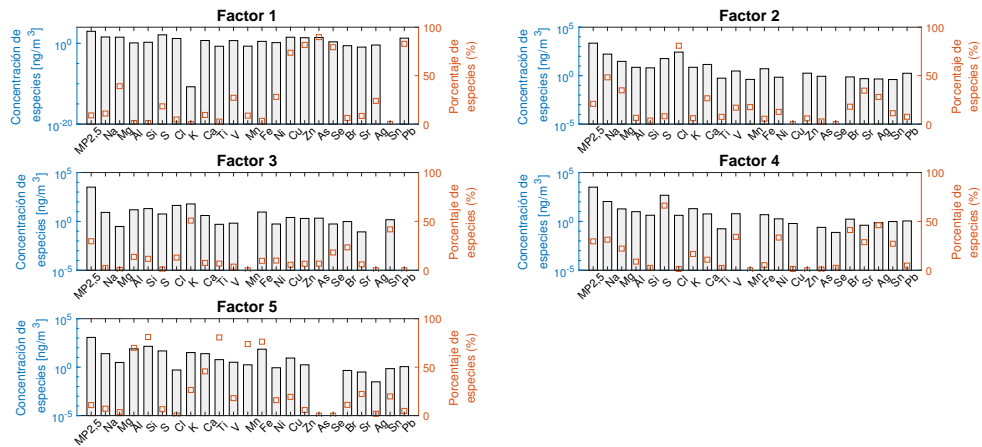


**Figura 3.22.** Factores modelados para una configuración de 4 fuentes en Quintero

Para Ventanas se encontró una solución estable de 5 factores. Se observó una buena correlación entre el modelo predictivo y lo observado para la masa del  $MP_{2.5}$  ( $R^2 = 0.73$ ). El Q teórico y robusto mostraron un 22% de diferencia.

- (i). El primer factor de la figura 3.23 se asocia a emisiones de carácter industrial. La presencia de las especies As y Se son trazadores de combustión de carbón (Khan et al., 2012) (Harrison et al., 1996), y en presencia de Pb, Cu y Zn es atribuido a emisiones directas de fundiciones de cobre (Kavouras et al., 2001). Estas emisiones pueden ser atribuidas a la termoeléctrica y refinería de cobre que se encuentran en el complejo industrial Ventanas.
- (ii). El segundo factor se asocia a aerosol marino por la presencia de las especies Cl, Na y Mg (Chand et al., 2010), lo que es esperable debido a que Ventanas es una localidad costera.
- (iii). El tercer factor se asocia a la quema de biomasa por la presencia de su principal trazador K (Barraza, Lambert, Jorquera, Villalobos, & Gallardo, 2017).
- (iv). El cuarto factor se asocia principalmente a emisiones industriales por combustión de petróleo por las especies S, V y Ni, y también se evidencian procesos mecánicos de metales, asociados a las especies Br y Ag (Viana et al., 2008).
- (v). El quinto factor se relaciona al polvo re-suspendido por la presencia de Al, Si, Ti, Mn y Fe (Achilleos et al., 2016).





**Figura 3.23.** Factores modelados para una configuración de 5 fuentes en Ventanas

A lo largo de las ejecuciones se han logrado identificar 6 fuentes, las que se han repetido y mezclado dependiendo de la configuración del programa.

- (i). Fundiciones de cobre: As, Se, Pb, Cu y Zn (Kavouras et al., 2001). Industriales (combustión y refinerías de petróleo): V y Ni (Viana et al., 2008).
- (ii). Sulfatos: S con pequeñas cantidades de Br (Querol et al., 1998).
- (iii). Sal Marina: Cl y Na (Achilleos et al., 2016).
- (iv). Polvo Suspendido: Al, Si, Ti, Mn y Fe (Achilleos et al., 2016).
- (v). Biomasa: K (Kavouras et al., 2001).

Se observa que Concón es el sitio más impactado por emisiones industriales. En Quintero y Ventanas existen emisiones de distintas características; Emisiones de la industria de la refinería del cobre y de petróleo atribuido a las diferentes empresas que forman el complejo Ventanas. Concón y Ventanas presentan igual contribución por aerosoles marinos, debido a su cercanía a la costa.

Los tres sitios de monitoreo presentan contribución por polvo re-suspendido, aerosoles marinos, e industrias. Y de los tres, Quintero es el único sitio donde no se observa un impacto por quema de biomasa, debido a su lejanía de las zonas con mayor población.

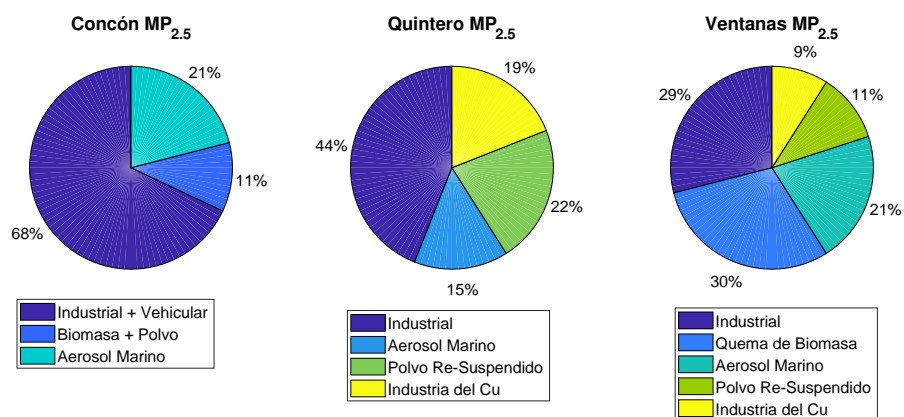


Figura 3.24. Porcentaje de contribución de fuentes al MP<sub>2.5</sub> en los sitios de la Quinta Región

### 3.3.4 MP<sub>10</sub> en Concepción

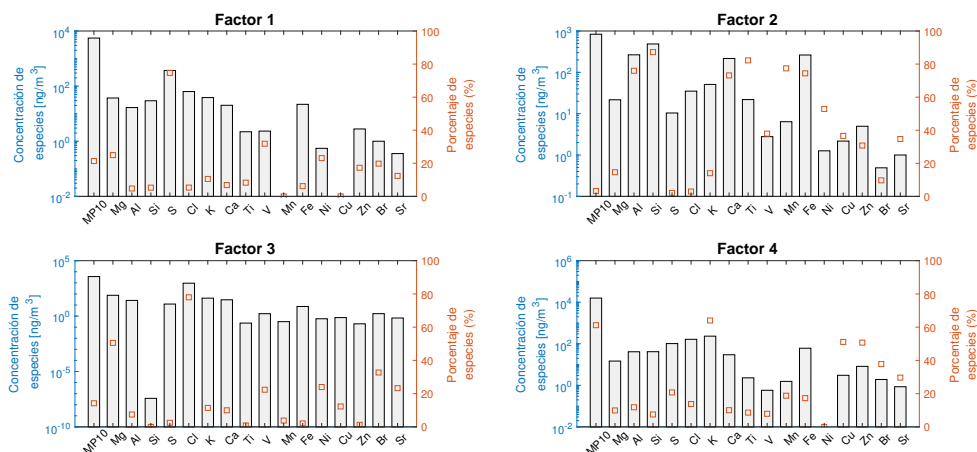
Para las especies muestreadas en los sitios de la región del Biobío se corrieron entre 6 y 3 factores soluciones, encontrando 3 y 4 factores como número máximo de fuentes físicamente explicables. Para el caso de los sitios de Concepción se eliminó la especie Na del set de datos por contaminación de las muestras.

Para KC se llegó a una solución estable de 4 factores. Se observó una buena correlación entre el modelo predictivo y lo observado para la masa del MP<sub>10</sub> ( $R^2 = 0.62$ ). El Q teórico y robusto mostraron un 24% de diferencia.

- (i). El primer factor se relaciona con emisiones industriales, debido a la presencia de las especies S, V y Ni, estas especies son comúnmente documentadas como oxidación de SO<sub>2</sub> (Querol et al., 1998) y de refinerías de petróleo (Viana et al., 2008).
- (ii). El segundo factor se asocia a polvo re-suspendido debido a la presencia de Al, Si, Ca, Ti, Mn y Fe (Achilleos et al., 2016) especies que se emiten a la atmósfera por el desgaste de superficies.
- (iii). El tercer factor se asocia a la presencia de sal marina debido al principal trazador Cl y viene acompañado con Mg, estas dos especies juntas se atribuyen al aerosol marino en sitios urbanos especialmente para la fracción gruesa (Viana et al., 2008) (Taiwo, Beddows, Shi, & Harrison, 2014).

- (iv). el cuarto factor se asocia a quema de biomasa por la presencia de su principal trazador K (Kavouras et al., 2001), y además está acompañado de trazadores de emisiones vehiculares, Cu, Zn y Br (Viana et al., 2008).

La serie de tiempo complementaria al perfil de factores de la solución se presenta en la sección 3.4 de anexos.



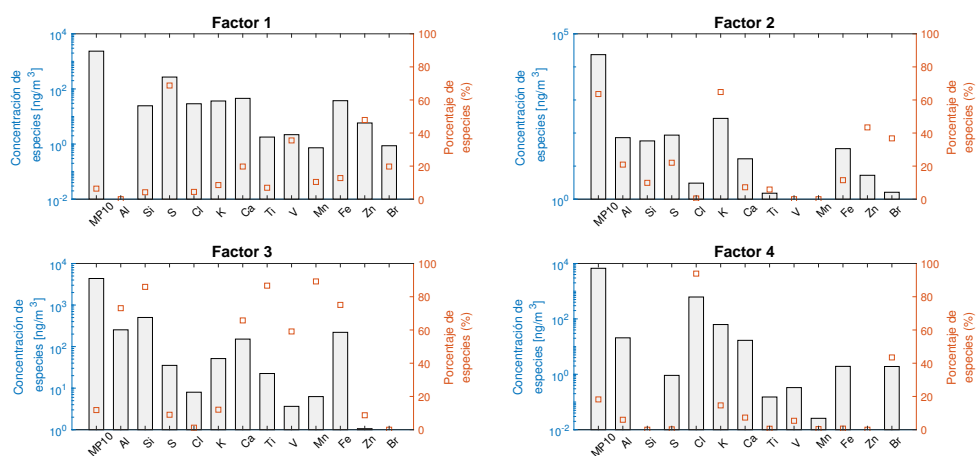
**Figura 3.25.** Factores modelados para una configuración de 4 fuentes en Kingston College

Para Hualqui se obtuvo una solución estable de 4 factores. Se observó una buena correlación entre el modelo predictivo y lo observado para la masa del  $MP_{10}$  ( $R^2 = 0.72$ ). El Q teórico y robusto mostraron un 28% de diferencia.

- (i). El primer factor presentado en la figura 3.26 se asocia a emisiones industriales por la presencia de S y V, dos especies asociadas a combustión de petróleo (Querol et al., 1998) (Viana et al., 2008).
- (ii). El segundo factor se asocia a quema de biomasa por la presencia de su principal trazador K (Kavouras et al., 2001), y algunos trazadores de emisiones vehiculares como Zn y Br (Viana et al., 2008).
- (iii). El tercer factor se asocia a polvo en suspensión por la presencia de elementos térreos como Al, Si, Ca, Ti, Mn y Fe, producido por el desgaste de superficies (Achilleos et al., 2016).

(iv). Y finalmente el cuarto factor se asocia a la presencia de sal marina por su principal trazador Cl (Chueinta, Hopke, & Paatero, 2000).

La serie de tiempo complementaria al perfil de factores de la solución se presenta en la sección 3.4 de anexos.



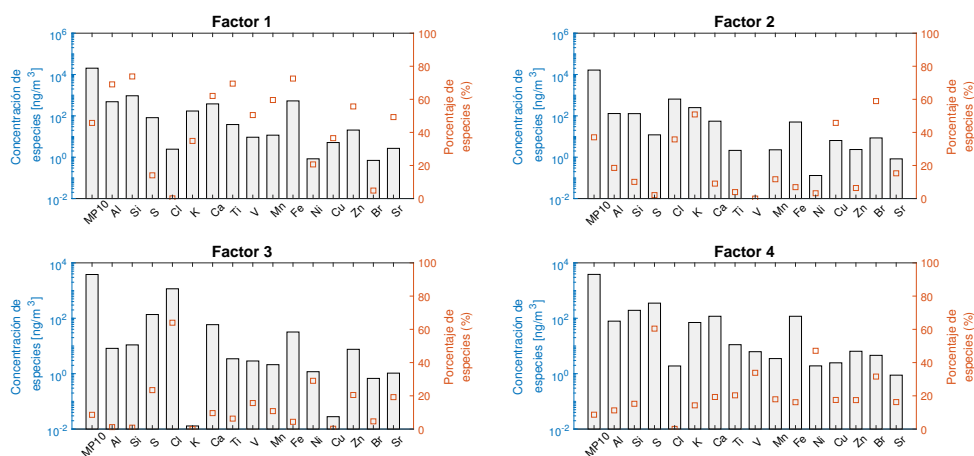
**Figura 3.26.** Factores modelados para una configuración de 4 fuentes en Hualqui

Para UDT se encontró una solución estable de 4 factores. Se observó una correlación regular entre el modelo predictivo y lo observado para la masa del MP<sub>10</sub> ( $R^2 = 0.5$ ). El Q teórico y robusto mostraron un 38% de diferencia.

- (i). El primer factor presentado en la figura 3.27 se relaciona con el polvo re-suspendido de las ciudades, por la presencia de los elementos Al, Si, Ca, Ti, Mn y Fe (Achilleos et al., 2016) los que se emiten a la atmósfera por el desgaste de superficies.
- (ii). El segundo factor se relaciona con quema de biomasa por la presencia de su principal trazador K (Kavouras et al., 2001), también se observa que junto a la quema de biomasa aparecen trazadores de fuentes vehiculares relacionados a las especies Cu y Br (Viana et al., 2008).
- (iii). El tercer factor se asocia a sales marinas por la presencia de Cl (Chueinta et al., 2000).

- (iv). El Cuarto factor se asocia a emisiones industriales por la dominancia de las especies S, V y Ni asociados comúnmente a procesos de refinerías de petróleo.

La serie de tiempo complementaria al perfil de factores de la solución se presenta en la sección 3.4 de anexos.

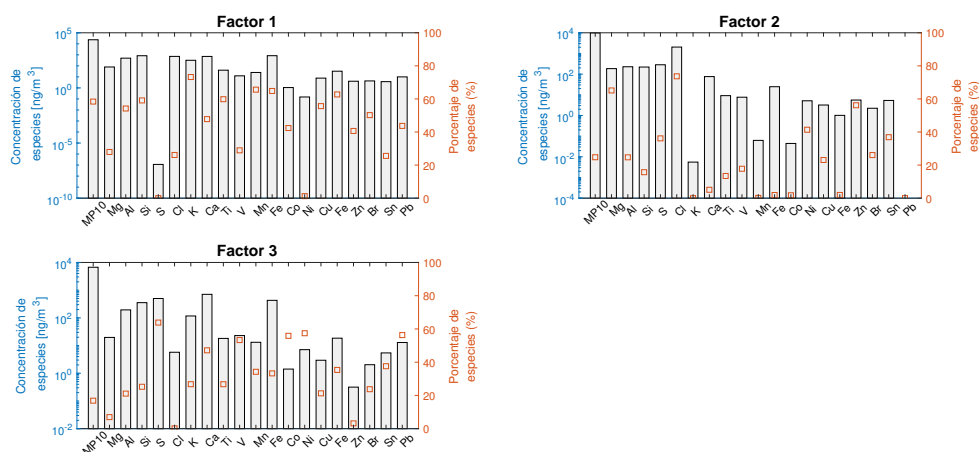


**Figura 3.27.** Factores modelados para una configuración de 3 fuentes en UDT

Para Consultorio se encontró una solución estable de 4 factores. Se observó una buena correlación entre el modelo predictivo y lo observado para la masa del MP<sub>10</sub> ( $R^2 = 0.64$ ). El Q teórico y robusto mostraron un 35% de diferencia.

- (i). El primer factor presentado en la figura 3.28 se asocia a Quema de biomasa por la presencia de su principal trazador K (Kavouras et al., 2001) y a emisiones vehiculares debido a las especies Cu, Fe y Br (Viana et al., 2008). La quema de biomasa es la principal fuente de calefacción domiciliaria adoptada por la población por lo que su contribución es esperable.
- (ii). El segundo factor se asocia con la presencia de sal marina, debido a su principal trazador Cl y presencia de Mg, donde se este último se ha reportado como proveniente de sal marina en entornos urbanos (Chand et al., 2010).
- (iii). Finalmente el tercer factor se asocia a fuentes industriales por la presencia de S, V, Cu y Ni, elementos asociados a la refinería de cobre (Kavouras et al., 2001) y petróleo (Viana et al., 2008).

La serie de tiempo complementaria al perfil de factores de la solución se presenta en la sección 3.4 de anexos.



**Figura 3.28.** Factores modelados para una configuración de 3 fuentes en Consultorio

En la figura 3.29 se observan los porcentajes de contribución de las fuentes al MP<sub>10</sub> en cada sitio. En los 4 sitios el mayor aporte es por quema de biomasa, especialmente en Hualqui y Kingston College. UDT posee un alto impacto de polvo re-suspendido. Hualqui es el sitio con menos contribución industrial, lo que es congruente con su clasificación de estación background, sus principales fuentes de contribución son quema de biomasa y aerosol marino. Consultorio es el sitio que posee mayor impacto industrial, debido a su cercanía al sector industrial de Talcahuano, como se indicó en la sección 1.3, la sal marina también es un factor importante de contribución al material particulado.

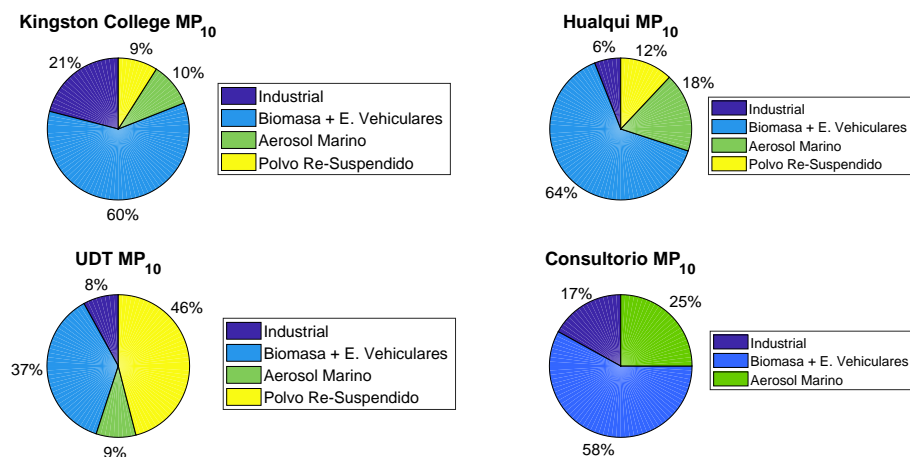


Figura 3.29. Porcentaje de contribución de fuentes al MP<sub>10</sub> en los sitios de la Octava Región

### 3.3.5 MP<sub>2.5</sub> en Concepción

Para las especies muestreadas del MP<sub>2.5</sub> en los sitios de la región del Biobío se corrieron entre 6 y 3 factores soluciones, encontrando 3 y 4 factores como número máximo de fuentes físicamente explicables.

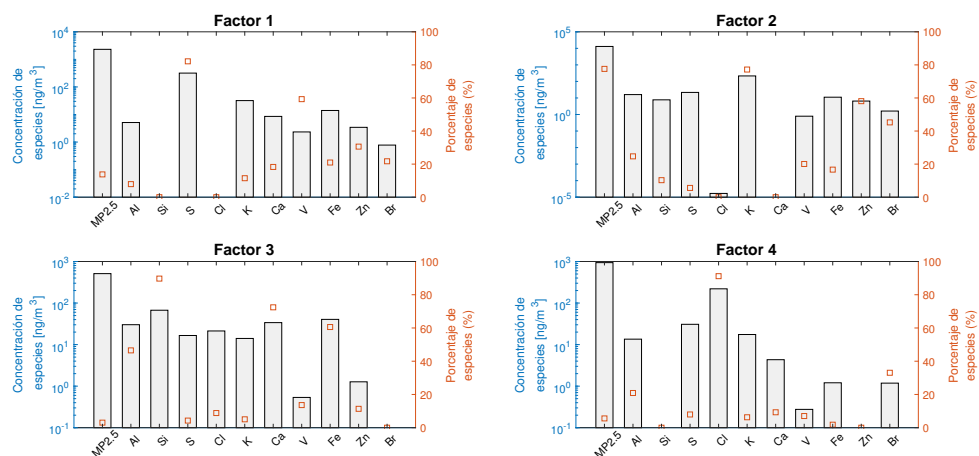
Para el caso de los sitios de Concepción se eliminó la especie Na del data set por contaminación de las muestras.

En KC se encontró una solución estable de 4 factores. Se observó una buena correlación entre el modelo predictivo y lo observado para la masa del MP<sub>2.5</sub> ( $R^2 = 0.78$ ). El Q teórico y robusto mostraron un 26% de diferencia.

- (i). El primer factor indica la presencia de fuentes industriales debido a la presencia de las especies S y V. Estas especies son principalmente asociadas a emisiones por refinерías de petróleo y carbón (Kavouras et al., 2001).
- (ii). El segundo factor se asocia a la quema de biomasa debido a la presencia de su principal trazador K (Kavouras et al., 2001).
- (iii). El tercer factor se asocia a polvo re-suspendido por la presencia de los elementos Al, Si, Ca y Fe que se producen por el desgaste de las superficies terrestres (Achilleos et al., 2016).

(iv). Finalmente el cuarto factor se asocia a la presencia de aerosol marino debido a su principal trazador Cl (Chueinta et al., 2000).

La serie de tiempo complementaria al perfil de factores de la solución se presenta en la sección 3.4 de anexos.



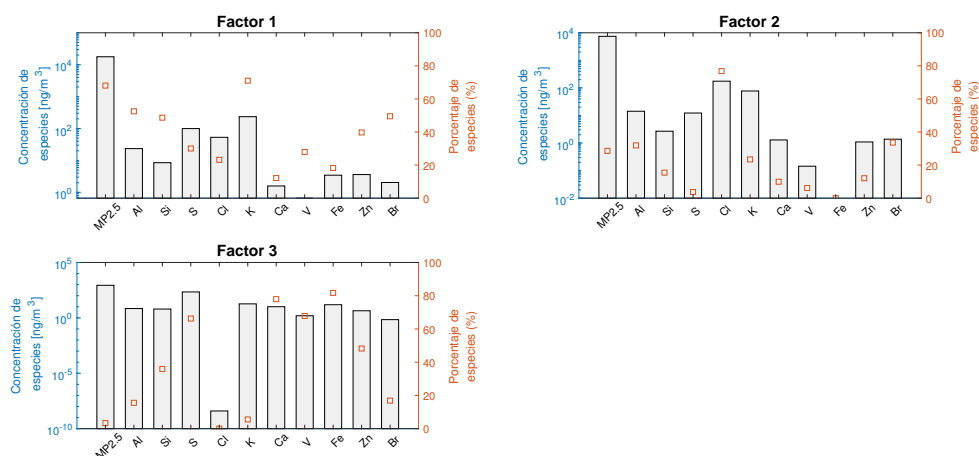
**Figura 3.30.** Factores modelados para una configuración de 4 fuentes en KC

Para Hualqui se obtuvo una solución estable de 3 factores. Se observó una buena correlación entre el modelo predictivo y lo observado para la masa del MP<sub>2.5</sub> ( $R^2 = 0.70$ ). El Q teórico y robusto mostraron un 25% de diferencia.

- (i). El primer factor se asocia a la quema de biomasa por la presencia del trazador K (Kavouras et al., 2001).
- (ii). El segundo factor se asocia a aerosol marino por la presencia del trazador Cl (Chueinta et al., 2000).
- (iii). Finalmente el tercer factor se asocia a emisiones industriales por la presencia de las especies S, V y Fe. El sulfato se produce en la atmósfera por la lenta oxidación de las emisiones de SO<sub>2</sub> (Querol et al., 1998) derivados de productos petrolíferos y de carbón, mientras que el V proviene de la refinación del petróleo (Viana et al., 2008).



La serie de tiempo complementaria al perfil de factores de la solución se presenta en la sección 3.4 de anexos.



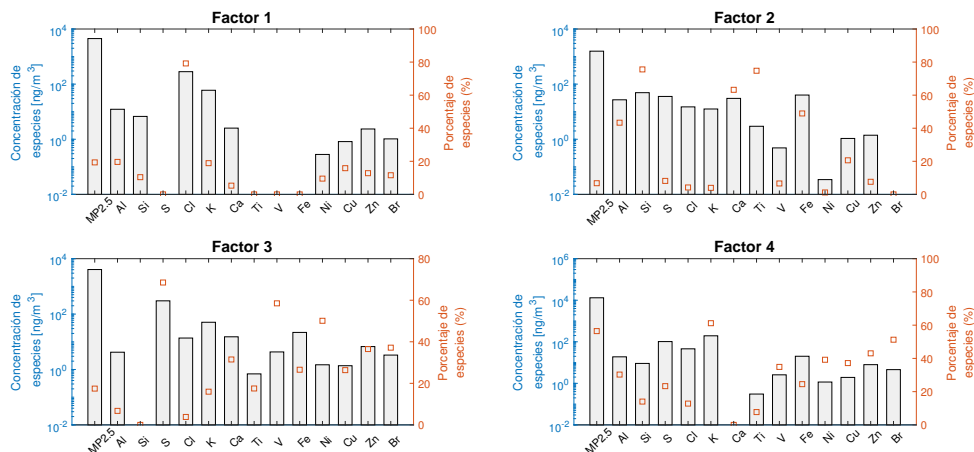
**Figura 3.31.** Factores modelados para una configuración de 3 fuentes en Hualqui

Para UDT se encontró una solución estable de 4 factores. Se observó una buena correlación entre el modelo predictivo y lo observado para la masa del MP<sub>2.5</sub> ( $R^2 = 0.74$ ). El Q teórico y robusto mostraron un 28% de diferencia.

- (i). El primer factor se asocia a aerosol marino por la alta presencia de la especie Cl, uno de los componentes principales del aerosol.
- (ii). El segundo factor se asocia al polvo re-suspendido (Achilleos et al., 2016) y emisiones de construcción (Chueinta et al., 2000) por la presencia de las especies Al, Si y Fe, y Ca y Ti respectivamente, estas especies se emiten a la atmósfera por el desgaste de superficies terrestres.
- (iii). El tercer factor se asocia a emisiones industriales por la presencia de las especies V, Ni y S. Las dos primeras especies son producidas principalmente por la refinerías de petróleo (Kavouras et al., 2001) y el S se forma por la oxidación de las emisiones de SO<sub>2</sub> (Querol et al., 1998).
- (iv). Finalmente el cuarto factor se asocia a emisiones por quema de biomasa debido a la presencia de la especie K, ampliamente identificada como trazadora de combustión de leña. La

quemado de biomasa es un recurso muy frecuentado principalmente como fuente de calefacción domiciliar, para el caso de UDT este factor viene acompañado con las especies Cu, Zn, Br y Fe, que se asocian a emisiones vehiculares (Viana et al., 2008).

La serie de tiempo complementaria al perfil de factores de la solución se presenta en la sección 3.4 de anexos.

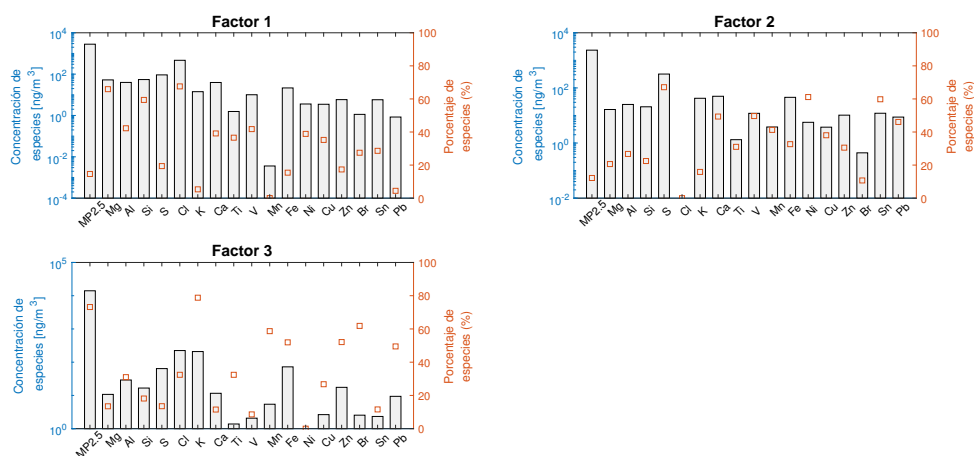


**Figura 3.32.** Factores modelados para una configuración de 3 fuentes en UDT

Para Consultorio se encontró una solución estable de 3 factores. Se observó una buena correlación entre el modelo predictivo y lo observado para la masa del  $MP_{2.5}$  ( $R^2 = 0.75$ ). El Q teórico y robusto mostraron un 22% de diferencia.

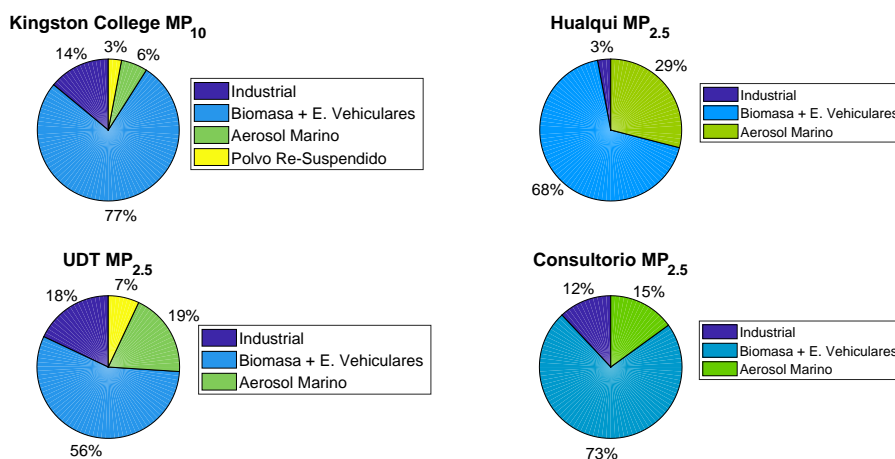
- (i). El primer factor se relaciona con la contribución de aerosol marino debido a la presencia de su principal trazador Cl y de Mg (Viana et al., 2008).
- (ii). El segundo factor se asocia a emisiones industriales por la presencia de las especies S, V y Ni, especies relacionadas con emisiones por refineras de carbón y petróleo (Querol et al., 1998) (Kavouras et al., 2001).
- (iii). Finalmente, el tercer factor, al igual que el caso del UDT, se asocia a 2 fuentes de emisión, la quema de biomasa por la presencia del trazador K (Kavouras et al., 2001) y a emisiones vehiculares por la presencia de Fe, Zn, Cu, Br y Pb (Viana et al., 2008).

La serie de tiempo complementaria al perfil de factores de la solución se presenta en la sección 3.4 de anexos.



**Figura 3.33.** Factores modelados para una configuración de 3 fuentes en Consultorio

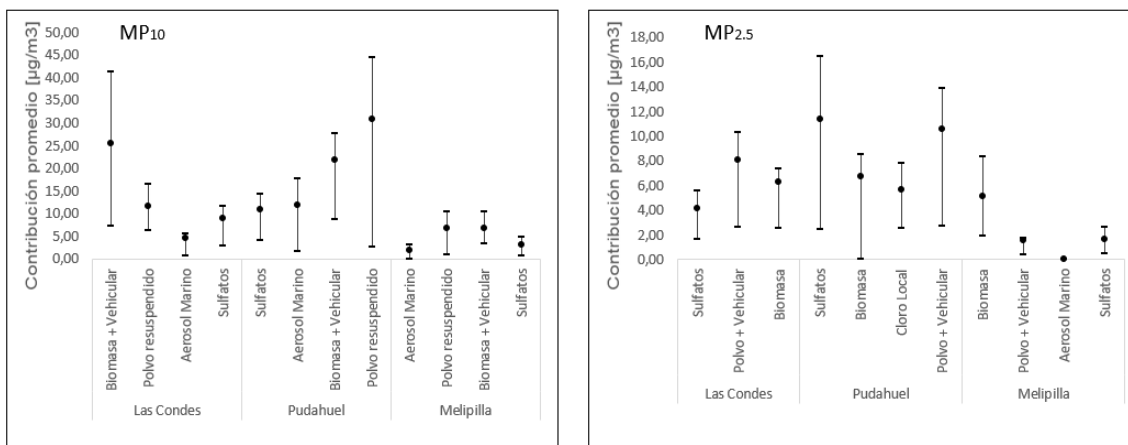
La figura 3.34 presenta el porcentaje de contribución de las fuentes al MP<sub>2.5</sub> para cada sitio de monitoreo. Se observa que el común denominador es la quema de biomasa, aportando sobre un 55%. El aporte industrial contribuye principalmente en UDT, seguido de KC y Consultorio. Los sitios que se encuentran cercanos al mar son los que presentan mayor aporte por aerosoles marinos, y son UDT, Hualqui y Consultorio. Se puede concluir que para la fracción fina el principal aporte se realiza por quema de biomasa.



**Figura 3.34.** Porcentaje de contribución de fuentes al MP<sub>2.5</sub> en los sitios de la Octava Región

### 3.3.6 Análisis comparativo de fuentes emisoras por estación

La figura 3.35 presenta el promedio de concentración de las fuentes encontradas para cada sitios de la RM para el  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$ , se puede observar que los niveles de  $MP_{10}$  son al menos 2 veces mayores que el  $MP_{2.5}$ . Además los factores que lideran en la RM son la quema de biomasa mezclado con emisiones vehiculares y el polvo resuspendido.



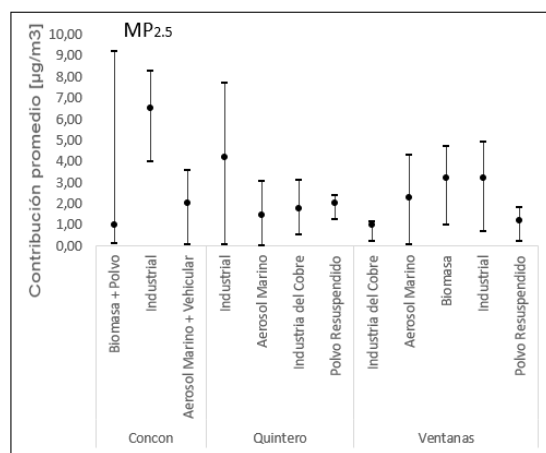
**Figura 3.35.** Promedio de Concentración, primer y tercer cuartil por factor para los sitios de la RM, a la izquierda para  $MP_{10}$  y a la derecha para  $MP_{2.5}$ .

En la tabla 3.15 se muestra el resumen del porcentaje de contribución de factores al  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$  para cada sitio monitoreado, además se presentan las principales especies del factor y la referencias en la literatura donde se han encontrado resultados similares.

**Tabla 3.15.** Principales factores encontrados en los sitios de la RM para MP<sub>10</sub> y MP<sub>2.5</sub>

Factor	Sitio - Corte - Aporte	Principales es- pecies	Referencias
Sulfatos	Las Condes-MP <sub>10</sub> -18%	S, Na	(Querol et al., 1998)(Achilleos et al., 2016)(Moreno, Gramsch, Oyola, & Rubio, 2010)
	Pudahuel-MP <sub>10</sub> -42%	S, Na	
	Melipilla-MP <sub>10</sub> -17%	S, Na	
	Las Condes-MP <sub>2.5</sub> -22%	S, Na	
	Pudahuel-MP <sub>2.5</sub> -42%	S, Na	
	Melipilla-MP <sub>2.5</sub> -20%	S, Na	
Biomasa (+ Vehicular)	Las Condes MP <sub>10</sub> 50%	K (Ni, Cu, Zr, Pb)	(Kavouras et al., 2001)(Viana et al., 2008)(Chand et al., 2010)(Barraza et al., 2017)(Moreno et al., 2010)
	Pudahuel MP <sub>10</sub> 15%	K	
	Melipilla MP <sub>10</sub> 36%	K (Ni, Cu, Br, Ag, Sn, Pb)	
	Las Condes MP <sub>2.5</sub> 34%	K, Cl (Br, Sn)	
	Pudahuel MP <sub>2.5</sub> 15%	K	
	Melipilla MP <sub>2.5</sub> 61%	K (Cu, Zn, Sr, Pb)	
Polvo (+ Vehicular)	Las Condes MP <sub>10</sub> 23%	Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe	(Achilleos et al., 2016)(Kavouras et al., 2001)
	Pudahuel MP <sub>10</sub> 28%	Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe (Cu, Zn, Br y Pb)	
	Melipilla MP <sub>10</sub> 36%	Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe	
	Las Condes MP <sub>2.5</sub> 44%	Al, Si, Ca, Ti, Fe (Cu, Zn, Pb)	
	Pudahuel MP <sub>2.5</sub> 28%	Al, Si, Ca, Ti, Fe (Cu, Zn, Pb)	
	Melipilla MP <sub>2.5</sub> 18%	Al, Si, Ca, Ti, Fe	
Aerosol Marino	Las Condes MP <sub>10</sub> 9%	Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe	(Achilleos et al., 2016)(Kavouras et al., 2001)
	Pudahuel MP <sub>10</sub> 15%	Cl, Na	
	Melipilla MP <sub>10</sub> 11%	Cl, Na	
	Melipilla MP <sub>2.5</sub> 1%	Cl, Na	

En la figura 3.36 se presentan las concentraciones de los factores para el MP<sub>2.5</sub>. Se observa que las concentraciones encontradas son menores a las que se presentan en la Región Metropolitana, y los factores que presentan mayor concentración son el factor industrial junto con la quema de biomasa.



**Figura 3.36.** Promedio de Concentración, primer y tercer cuartil por factor para los sitios de la Quinta Región. A la izquierda para MP<sub>10</sub> y a la derecha para MP<sub>2.5</sub>

En la tabla 3.16 se presenta el resumen de las contribuciones de los factores al MP<sub>2.5</sub> en la Quinta Región. Se puede observar que el principal aporte es por el factor industrial, seguido de quema de biomasa y finalmente polvo resuspendido. También se encuentra el aerosol marino ya que es común en localidades costeras.

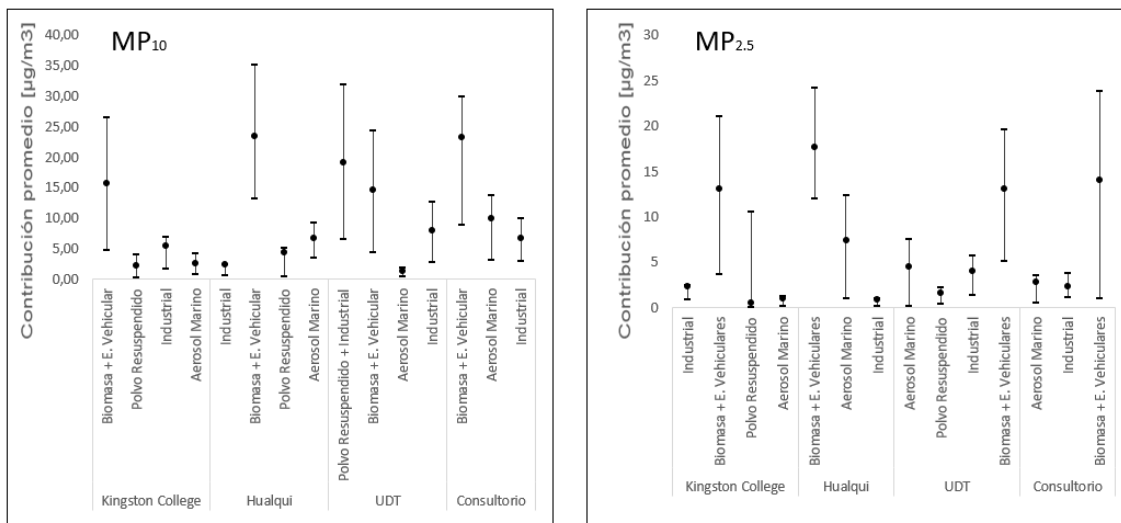
**Tabla 3.16.** Principales factores encontrados en los sitios de la Quinta Región para el MP<sub>2.5</sub>

Factor	Sitio - Corte - Aporte	Principales especies	Referencias
Industrial 1	Concón - MP <sub>2.5</sub> - 68%	S, V, Ni, As, Se	(Querol et al., 1998)(Khan et al., 2012)(Kavouras et al., 2001)(Karanasiou et al., 2009)
	Quintero - MP <sub>2.5</sub> - 44%	S, V, Ni, Br	(Kavouras et al., 2001)(Karanasiou et al., 2009)
	Ventanas - MP <sub>2.5</sub> - 29%	S, V, Ni, Br	(Kavouras et al., 2001)(Karanasiou et al., 2009)
Biomasa	Concón - MP <sub>2.5</sub> - 11%	K (Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe)	(Kavouras et al., 2001)(Chand et al., 2010)(Barraza et al., 2017)
	Ventanas - MP <sub>2.5</sub> - 30%	K, Sn	(Chand et al., 2010)(Barraza et al., 2017)
Polvo	Quintero - MP <sub>2.5</sub> - 28%	Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe, Sr y Ag	(Achilleos et al., 2016)(Kavouras et al., 2001)
	Ventanas - MP <sub>2.5</sub> - 36%	Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe	(Achilleos et al., 2016)(Kavouras et al., 2001)
Aerosol Marino	Concón - MP <sub>2.5</sub> - 21%	Cl, Na	(Chand et al., 2010)(Manousakas et al., 2017)
	Quintero - MP <sub>2.5</sub> - 15%	Cl, Na	(Chand et al., 2010)(Manousakas et al., 2017)
	Ventanas - MP <sub>2.5</sub> - 21%	Cl, Na	(Chand et al., 2010)(Manousakas et al., 2017)
Industrial 2	Quintero - MP <sub>2.5</sub> - 19%	Cu, Zn, As, Se y Pb	(Khan et al., 2012)(Kavouras et al., 2001)
	Ventanas - MP <sub>2.5</sub> - 9%	Cu, Zn, As, Se y Pb	(Khan et al., 2012)(Kavouras et al., 2001)

En la imagen 3.37 se presenta la concentración por factor para los sitios de la Octava Región. Se puede ver que los niveles de concentración del MP<sub>10</sub> es comparable a las concentraciones de la RM, sin embargo, los niveles de MP<sub>2.5</sub> son mucho mayores que los encontrados en la RM. Es decir,

la razón  $MP_{2.5} / MP_{10}$  es cercana a 1.

Los factores con mayor concentración son la quema de biomasa seguido por el industrial.



**Figura 3.37.** Promedio de Concentración, primer y tercer cuartil por factor para los sitios de la Octava Región. A la izquierda para  $MP_{10}$  y a la derecha para  $MP_{2.5}$

En la tabla 3.37 se muestra el resumen del porcentaje de contribución de factores al  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$  para cada sitio monitoreado, además se presentan las principales especies del factor y la referencias en la literatura donde se han encontrado resultados similares. La principal contribución la hace la quema de biomasa, utilizada como principal fuente de calefacción de los hogares. El segundo aporte más importante lo realiza el sector industrial en los sitios urbanos, y finalmente el tercer factor más importante es el aerosol marino, factor comúnmente encontrado en localidades costeras.

**Tabla 3.17.** Principales factores encontrados en la Región del Biobío para el MP<sub>10</sub> y MP<sub>2.5</sub>

Factor	Sitio - Corte - Aporte	Principales especies	Referencias
Industrial	KC - MP <sub>10</sub> - 21%	S, Na, V, Ni	(Querol et al., 1998)(Viana et al., 2008)(Kavouras et al., 2001)(Karanasidou et al., 2009)
	Hualqui - MP <sub>10</sub> - 6%	S, V, Zn	
	UDT - MP <sub>10</sub> - 8%	S, V, Ni	
	Consultorio - MP <sub>10</sub> - 17%	S, V, Co, Ni, Pb	
	KC - MP <sub>2.5</sub> - 14%	S, V, Zn	
	Hualqui - MP <sub>2.5</sub> - 3%	S, V, Fe	
	UDT - MP <sub>2.5</sub> - 18%	S, V, Ni	
Consultorio - MP <sub>2.5</sub> - 12%	S, V, Ni, Sn		
Biomasa + E. Vehiculares	KC - MP <sub>10</sub> - 60%	K (Cu, Zn, Br)	(Kavouras et al., 2001)(Chand et al., 2010)(Barraza et al., 2017)
	Hualqui - MP <sub>10</sub> - 64%	K (Zn, Br)	
	UDT - MP <sub>10</sub> - 37%	K, Cl (Cu, Br)	
	Consultorio - MP <sub>10</sub> - 58%	K (Cu, Fe, Br, Pb)	
	KC - MP <sub>2.5</sub> - 77%	K (Zn, Br)	
	Hualqui - MP <sub>2.5</sub> - 68%	K (Zn, Br)	
	UDT - MP <sub>2.5</sub> - 56%	K (Ni, Cu, Zn, Br)	
Consultorio - MP <sub>2.5</sub> - 73%	K (Ni, Zn, Br, Pb)		
Polvo	KC - MP <sub>10</sub> - 9%	Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe	(Achilleos et al., 2016)(Kavouras et al., 2001)
	Hualqui - MP <sub>10</sub> - 12%	Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe	
	UDT - MP <sub>10</sub> - 46%	Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe	
	KC - MP <sub>2.5</sub> - 3%	K Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe	
UDT - MP <sub>2.5</sub> - 7%	K Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe		
Aerosol Marino	KC - MP <sub>10</sub> - 10%	Cl, Mg	(Chand et al., 2010)(Manousakas et al., 2017)
	Hualqui - MP <sub>10</sub> - 18%	Cl	
	UDT - MP <sub>10</sub> - 9%	Cl	
	Consultorio - MP <sub>10</sub> - 25%	Cl, Mg	
	KC - MP <sub>2.5</sub> - 6%	Cl	
	Hualqui - MP <sub>2.5</sub> - 29%	Cl	
	UDT - MP <sub>2.5</sub> - 19%	Cl	
Consultorio - MP <sub>2.5</sub> - 15%	Cl, Mg		



## Conclusiones

Se analizó la variabilidad espacial del  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$  con base en la caracterización de las fuentes de aporte en base a especies trazadores de fuentes en cada uno de los sitios de medición.

Se encontró que las concentraciones de las especies del  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$  se ven significativamente afectadas por las precipitaciones, temperatura, y magnitudes de viento, parámetros que se relacionan con la capacidad de ventilación de las ciudades.

Con respecto al  $MP_{10}$ , tanto en la RM como en el Biobío se presentan rangos de concentración entre 5 y 40 ( $\mu g/m^3$ ). Además, se observa que Santiago presenta mayores concentraciones por polvo re-suspendido ( $30.73 \mu g/m^3$ ) y emisiones vehiculares ( $25.45 \mu g/m^3$ ), mientras que la región del Biobío presenta mayor concentración por quema de biomasa mezclado con emisiones vehiculares ( $23.42 \mu g/m^3$ ) y emisiones industriales ( $19.14 \mu g/m^3$ ). En relación a los porcentajes de aporte al  $MP_{10}$ , en la RM el mayor aporte lo tiene el polvo re-suspendido (36% en Melipilla) y la quema de biomasa (50% en Las Condes), mientras que en los sitios del sur el mayor aporte lo realiza la quema de biomasa (60%), el aerosol marino (25%), seguidos de las emisiones industriales (21%).

Con respecto al  $MP_{2.5}$ , la Octava Región presenta las concentraciones más altas de las 3 regiones de estudio superando los 20 ( $\mu g/m^3$ ), seguido de la RM alcanzando los 16 ( $\mu g/m^3$ ) y finalmente la Quinta Región que no alcanzan a llegar a los 10 ( $\mu g/m^3$ ). Se observa que la mayor concentración por quema de biomasa se presenta en la región del Biobío superando los 15  $\mu g/m^3$  en Hualqui. La mayor concentración por emisiones vehiculares están en la región metropolitana llegando a los 10 ( $\mu g/m^3$ ) y las concentraciones industriales en la Quinta y Octava Región son muy similares variando entre 4 y 6 ( $\mu g/m^3$ ). En relación al porcentaje de los aportes al  $MP_{10}$ , Santiago recibe aportes industriales exclusivamente de sulfatos envejecidos, no así en las otras dos regiones, y donde el aporte llega hasta un 68% en Concón. El principal aporte para la RM es quema de biomasa y polvo en suspensión (61 y 44%). El principal aporte para la Quinta Región es el factor industrial (68%) y quema de biomasa (30%). El principal aporte para la región del Biobío es la quema de biomasa (77%) y el aerosol marino (29%).

En general, para  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$ , se observó que la quema de biomasa es una fuente que se aísla en las tres regiones, y alcanza aportes significativos contribuyendo entre un 11% en la Quinta Región hasta un 77% en la Región del Biobío.



## Referencias Bibliográficas

- Achilleos, S., Wolfson, J., Ferguson, S., Kang, C., & Hadjimitsis, D. (2016). Spatial variability of fine and coarse particle composition and sources in cyprus. *Atmospheric Research*, *169*, 255-270.
- Almuna, E., Alonso, M., & Manríquez, V. (2012). Industrialización desarrollo y ciudad: transformaciones socio-demográficas y espaciales en la geografía social del gran concepción (1950-2010). *Revista Invi*, *27(75)*, 21-71.
- Barraza, F., Lambert, F., Jorquera, H., Villalobos, A., & Gallardo, A. (2017). Temporal evolution of main ambient mp2.5 sources in santiago, chile, from 1998 to 2012. *Atmospheric chemistry and physics*, *17*, 10093-10107.
- Brook, R., Rajagopalan, S., Pope, C., Brook, J., & Bhatnagar, A. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease. *AHA Scientific Statement*, *121*, 2331-2378.
- Brown, S., Eberly, S., Paatero, P., & Norris, A. (2015). Methods for estimating uncertainty in pmf solutions: Examples with ambient air and water quality data and guidance on reporting pmf results. *Science of the Total Environment*, *518-519*, 626-635.
- Chand, D., Hegg, D., Wood, R., Shaw, G., D, W., & D, C. (2010). Source attribution of climatically important aerosol properties measured at paposo (chile) during vocals. *Atmospheric chemistry and physics*, *10*, 10789-10802.
- Chueinta, W., Hopke, P., & Paatero, P. (2000). Investigation of sources of atmospheric aerosol at urban and suburban residential areas in thailand by positive matrix factorization. *Atmospheric Environment*, *34*, 3319-3329.
- Dockery, D., Pope, C., Xu, X., & J, S. (1993). An association between air pollution and mortality in six u.s. cities. *the new england journal of medicine*, *329*, 1753-1759.
- Garreaud, R., & Rutllant, J. (2006). Factores meteorológicos de la contaminación en santiago. *Colección de Química ambiental*, *2*, 36-53.
- Gent, J., Koutrakis, P., Belanger, K., Triche, E., Holford, T., Bracken, M., & Leaderer, B. (2009). Symptoms and medication use in children with asthma and traffic-related sources of fine particle pollution. *Environment Health Perspective*, *117*, 1168-1174.
- Harrison, R., Smith, D., & Luhana, L. (1996). Source apportionment of atmospheric polycyclic

- aromatic hydrocarbons collected from an urban location in birmingham, u.k. *Environmental science and technology*, 30:3, 825-832.
- Karanasiou, A., Siskos, P., & Eleftheriadis, K. (2009). Assessment of source apportionment by positive matrix factorization analysis on fine and coarse urban aerosol size fractions. *Atmospheric environment*, 43, 3385-3395.
- Kavouras, I., Koutrakis, P., Cereceda, F., & Oyola, P. (2001). Source apportionment of pm10 and pm2.5 in five chilean cities using factor analysis. *Air and Waste Management Association*, 51, 451-464.
- Khan, F., Hirano, K., & Masunaga, S. (2012). Assessment of the sources of suspended particulate matter aerosol using us epa pmf 3.0. *Environment Monitoring Assessment*, 184, 1063-1083.
- Kim, S., Hong, K., Jun, H., Park, Y., & Sunwoo, Y. (2014). Effect of precipitation on air pollutant concentration in seoul, korea. *Atmospheric Environment*, 8-4, 202-211.
- Koutrakis, P., Sax, S., Sarnat, J., Coull, B., Demokritou, P., Oyola, P., ... Gramsch, E. (2005). Analysis of pm2.5, and pm2.5-10 concentrations in santiago, chile, from 1989 to 2001. *Air and Waste Management Association*, 55, 342-351.
- Lall, R., Ito, K., & Thurston, G. (2011). Distributed lag analyses of daily hospital admissions and source-apportioned fine particle air pollution. *Environment Health Perspective*, 119, 455-460.
- Manousakas, M., Papaefthymiou, H., Diapouli, E., Migliori, A., Karydas, A., Bogdanovic-Radovic, I., & Eleftheriadis, K. (2017). Assessment of pm2.5 sources and their corresponding level of uncertainty in a coastal urban area using epa pmf 5.0 enhanced diagnostics. *Science of the total environment*, 574, 155-164.
- Marple, V., Rubow, K., Turner, W., & Spengler, J. (1987). Low flow rate sharp cut impactors for indoor air sampling: Design and calibration. *Air and Waste Management Association*, 37:11, 1303-1307.
- Moreno, F., Gramsch, E., Oyola, P., & Rubio, M. (2010). Modification in the soil and traffic-related sources of particle matter between 1998 and 2007 in santiago de chile. *Air and Waste management association*, 60, 1410-1421.
- Oravisjärvi, K., Timonen, K., Wiikinkoski, T., Ruuskanen, A., Heinänen, K., & Ruuskanen, J. (2003). Source contributions to pm2.5 particles in the urban air of a town situated close to a steel works. *Atmospheric Environment*, 37, 1013-1022.
- Paatero, P. (1997). Least squares formulation of robust non-negative factor analysis. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 37, 23-35.
- Pope, C., Thun, M., Namboodiri, M., Dockery, D., Evans, J., Speizer, E., & C, H. (1995). Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of u.s. adults. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 151, 669-674.

- Querol, X., Alastey, A., Puigercus, J., Mantilla, E., Ruiz, C., Lopez-Soler, A., . . . R, J. (1998). Seasonal evolution of suspended particles around a large coal-fired power station: Chemical characterization. , *32:4*, 719-731.
- Raaschou-Nielsen, O., Anderser, Z., Beelen, R., Samoli, E., & Stafoggia, M. (2016). Long-term MP2.5 exposure and neurological hospital admissions in the northeastern united states. *Environmental Health Perspectives*, *124*, 23-29.
- Taiwo, A., Beddows, D., Shi, Z., & Harrison, R. (2014). Mass and number size distributions of particulate matter components: Comparison of an industrial site and an urban background site. *Science of total environment*, *475*, 29-38.
- Viana, M., Kuhlbusch, T., Querol, X., Alastey, A., Harrison, R., Hopke, P., & Winiwarter, W. (2008). Source apportionment of particulate matter in europe: A review of methods and results. *Aerosol Science*, *39*, 827-849.

# Anexos

## 3.4 Series de tiempo para los factores de los sitios de monitoreo

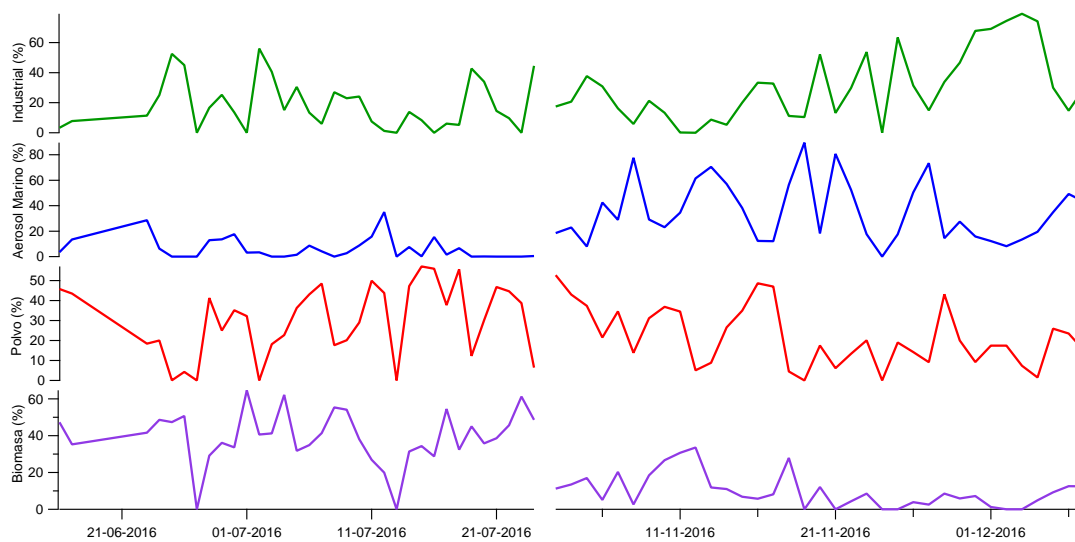
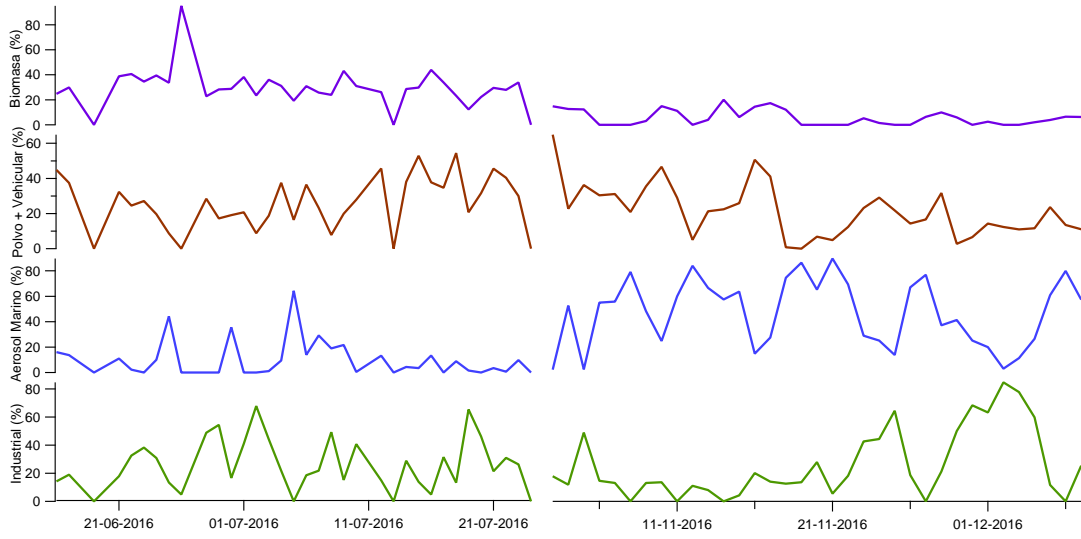
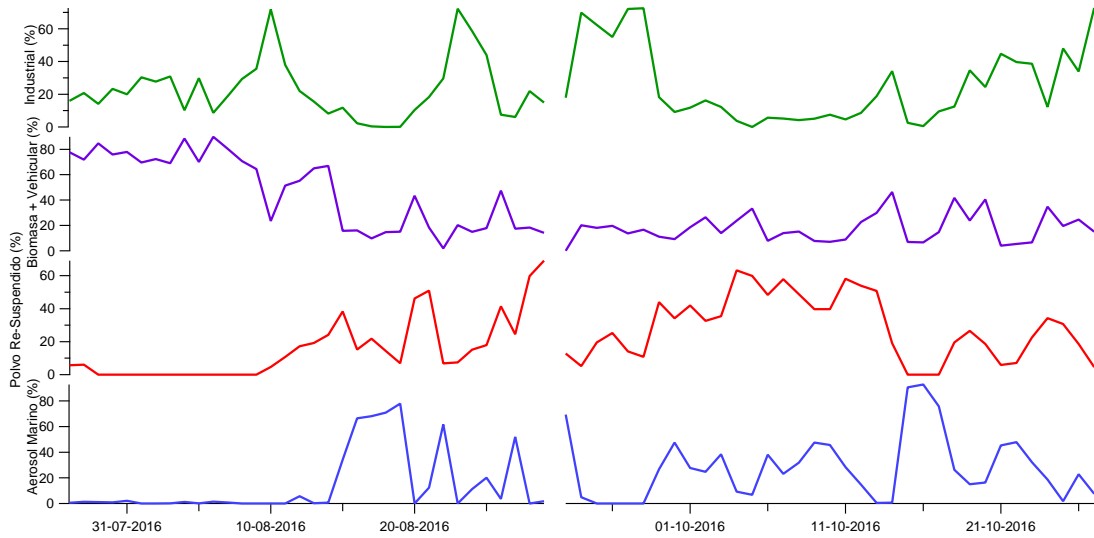


Figura 3.38. Serie de tiempo para una configuración de 4 factores encontrados en Las Condes -  $MP_{10}$



**Figura 3.39.** Serie de tiempo para una configuración de 4 factores encontrados en Pudahuel - MP<sub>10</sub>



**Figura 3.40.** Serie de tiempo para una configuración de 4 factores encontrados en Melipilla - MP<sub>10</sub>



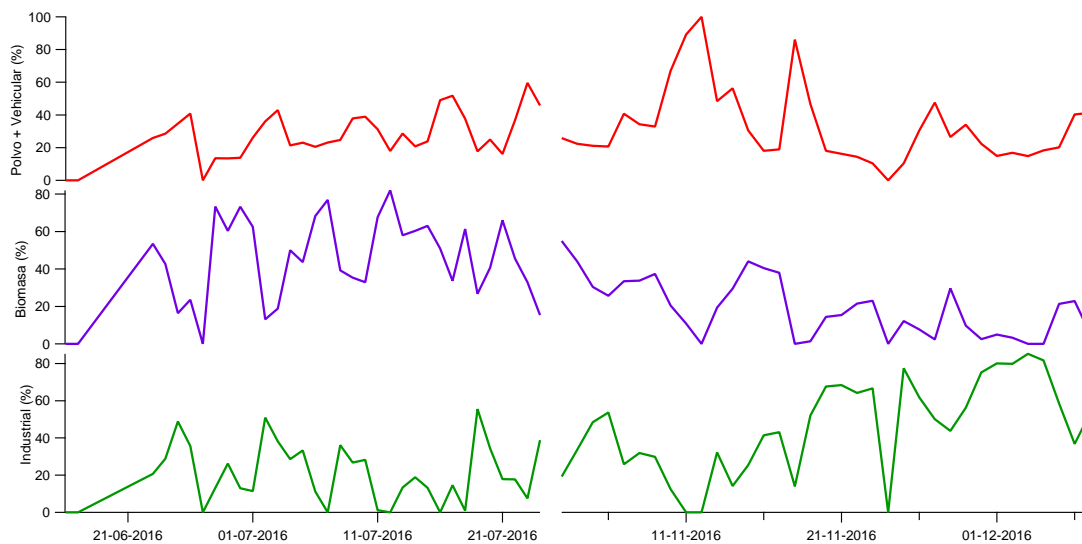


Figura 3.41. Serie de tiempo para 3 factores encontrados en Las Condes -  $MP_{2.5}$

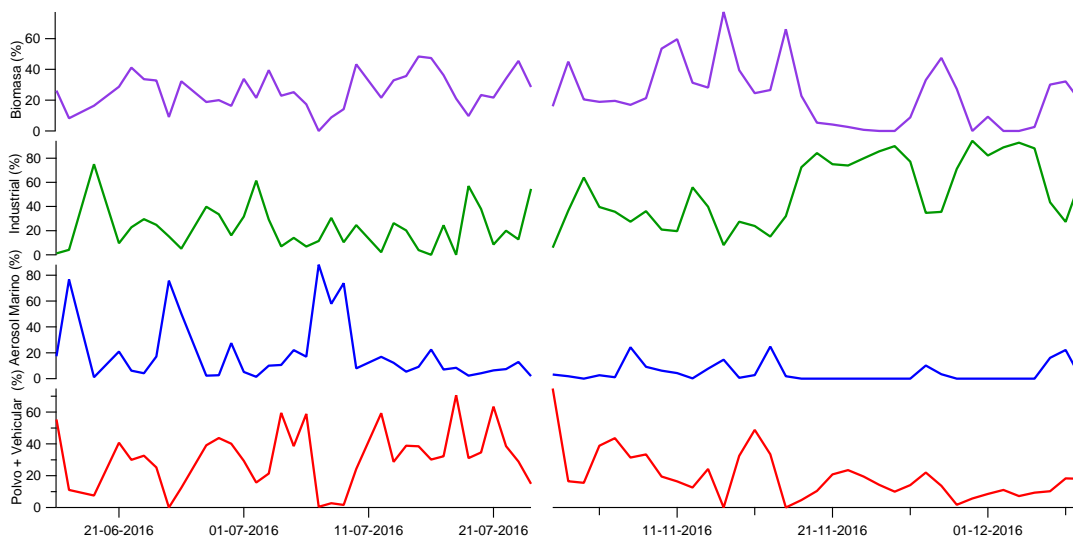
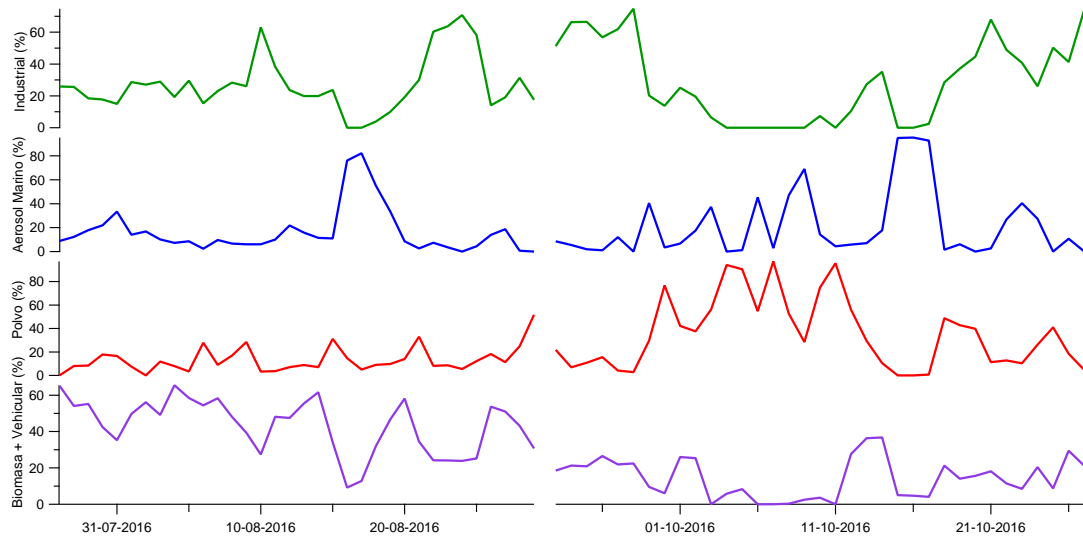
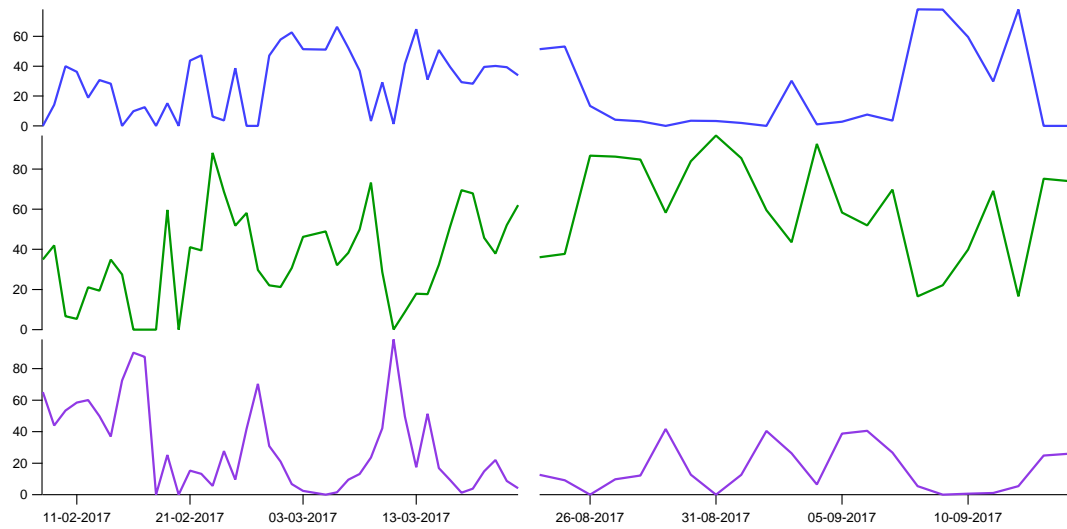


Figura 3.42. Serie de tiempo para 4 factores encontrados en Pudahuel -  $MP_{2.5}$



**Figura 3.43.** Serie de tiempo para 4 factores encontrados en Melipilla -  $MP_{2.5}$



**Figura 3.44.** Serie de tiempo para los 3 factores encontrados en Concón -  $MP_{2.5}$

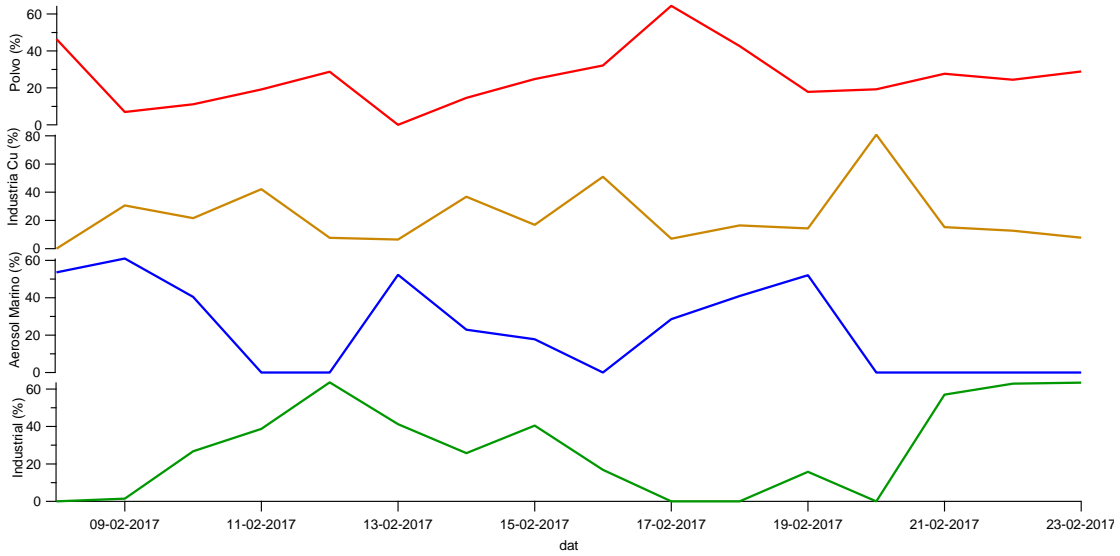


Figura 3.45. Serie de tiempo para los 4 factores encontrados en Quintero -  $MP_{2.5}$

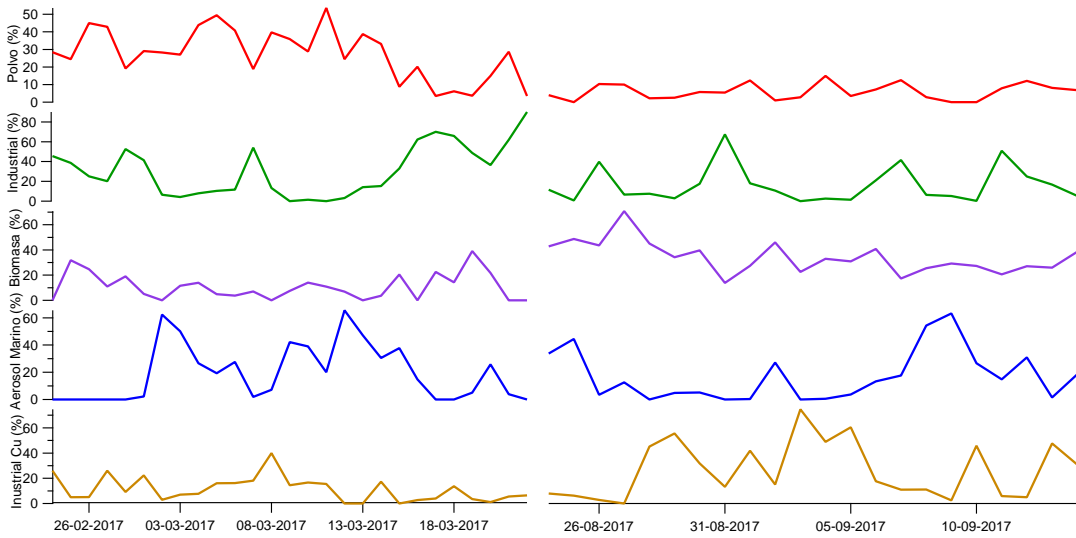
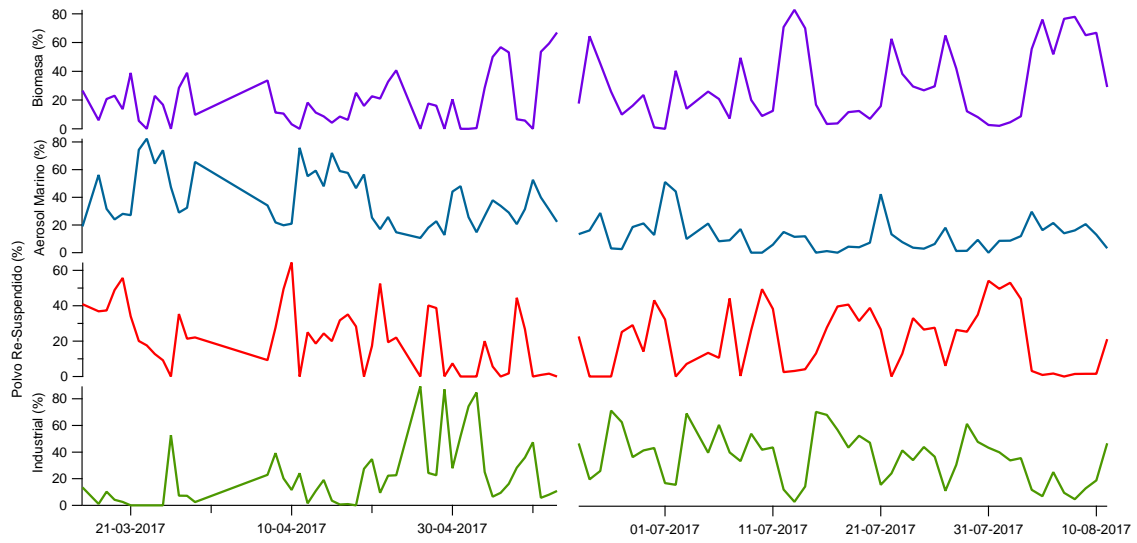
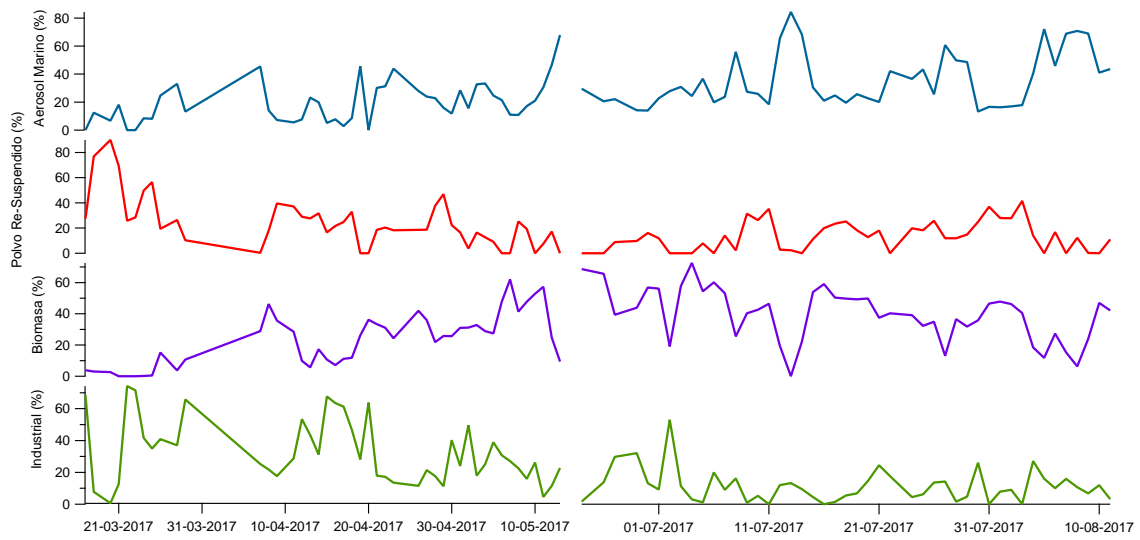


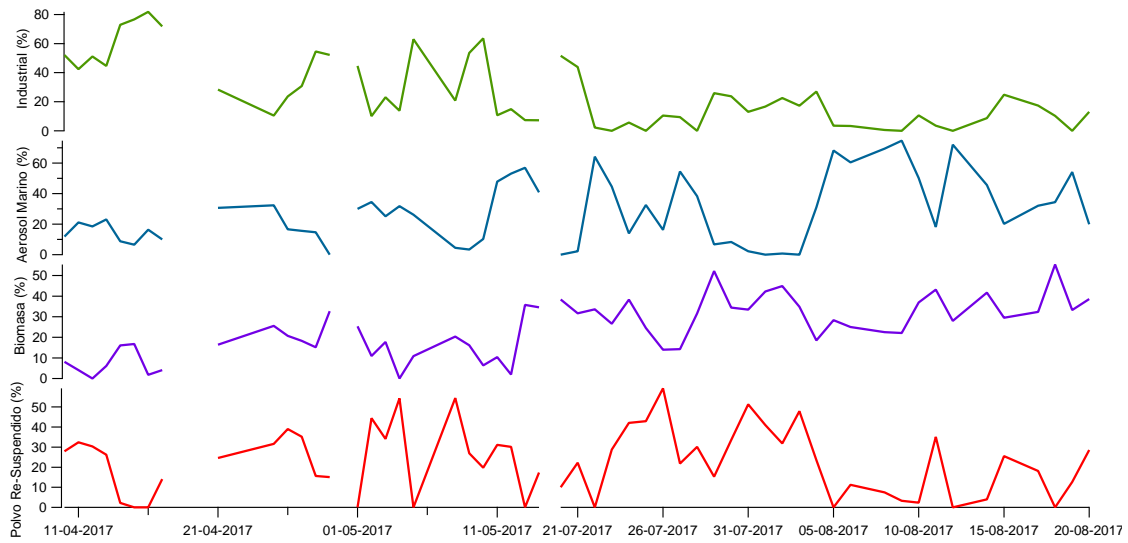
Figura 3.46. Serie de tiempo para los 5 factores encontrados en Ventanas-  $MP_{2.5}$



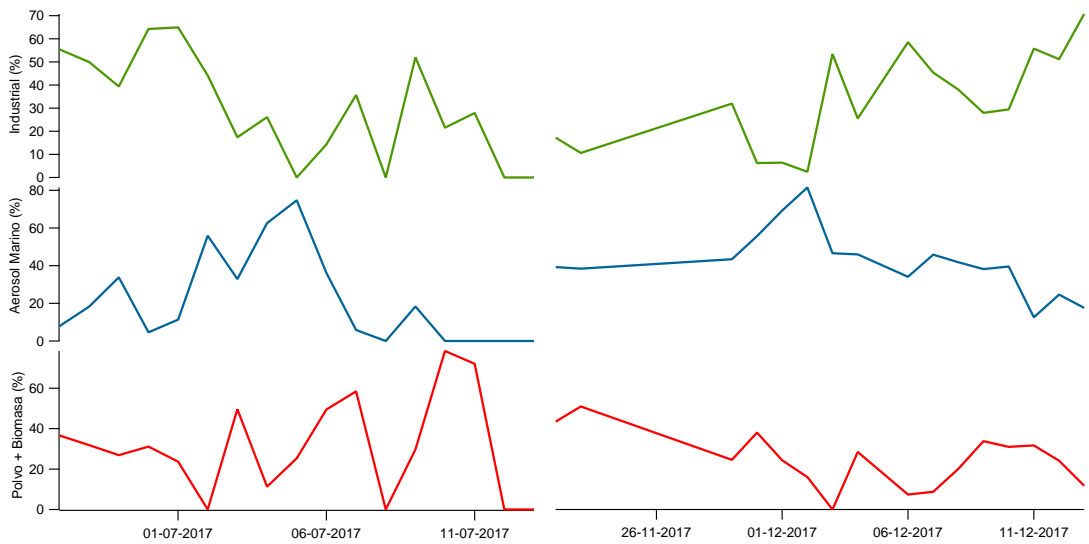
**Figura 3.47.** Serie de tiempo de los 4 factores encontrados para KC -  $MP_{10}$



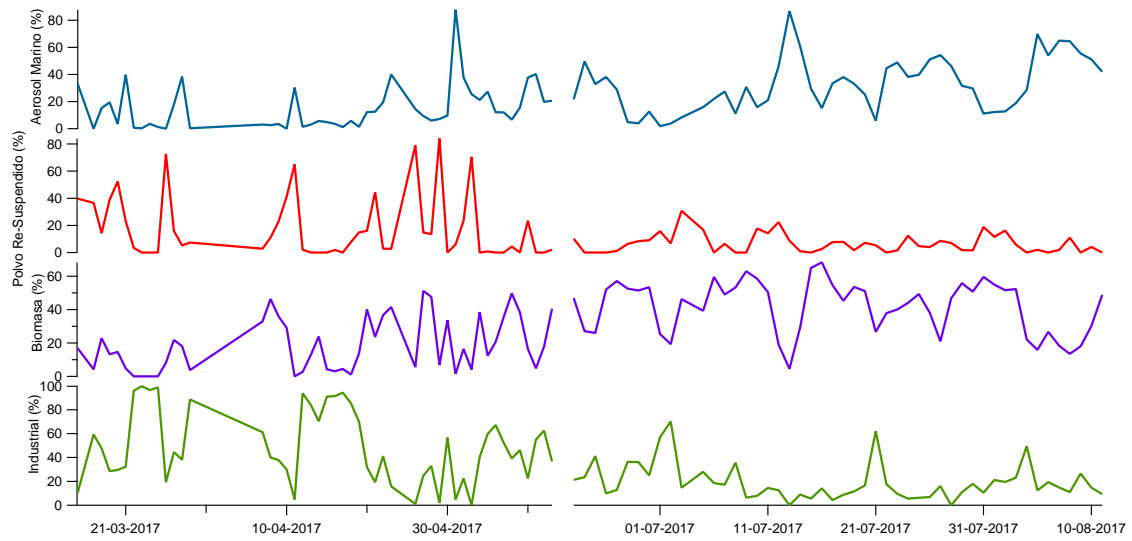
**Figura 3.48.** Serie de tiempo de los 4 factores encontrados para Hualqui -  $MP_{10}$



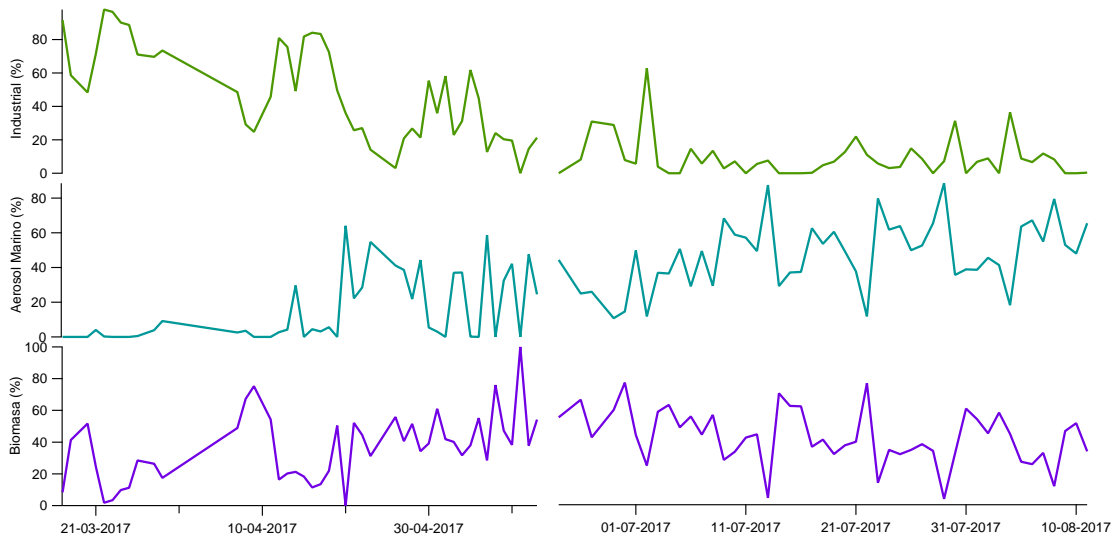
**Figura 3.49.** Serie de tiempo de los 4 factores encontrados para UDT - MP<sub>10</sub>



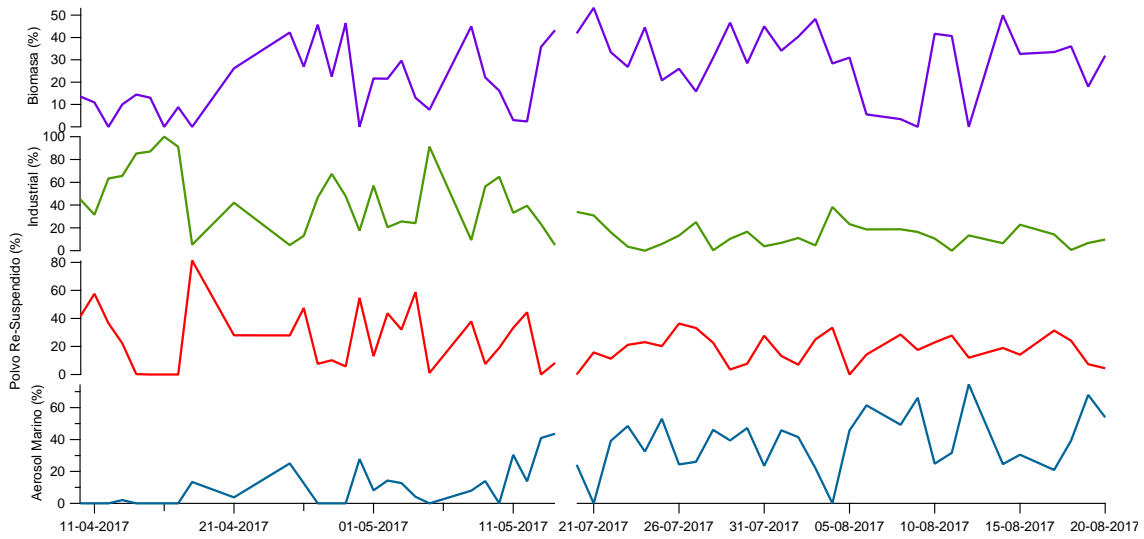
**Figura 3.50.** Serie de tiempo de los 3 factores encontrados para Consultorio - MP<sub>10</sub>



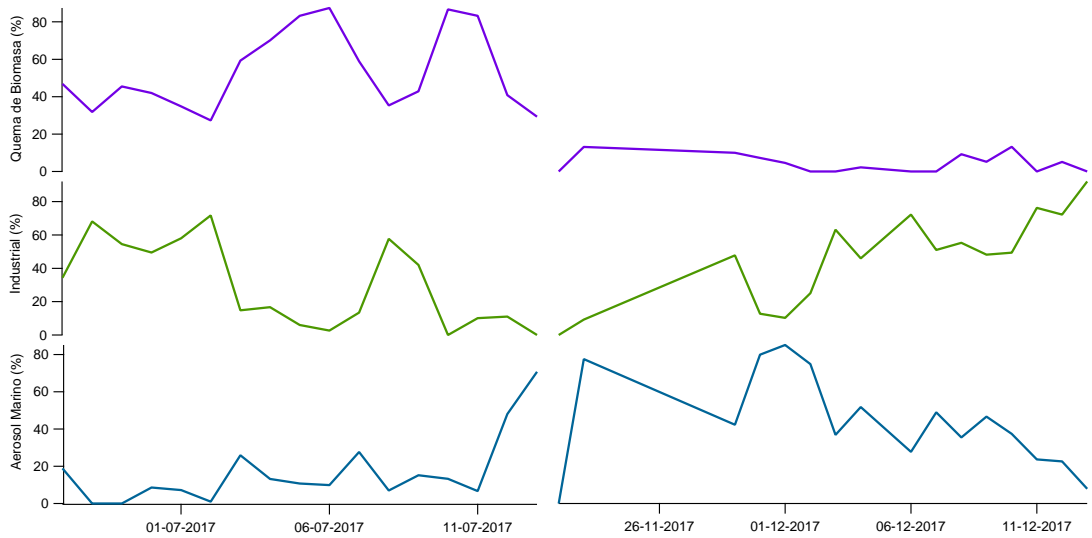
**Figura 3.51.** Serie de tiempo para los 4 factores encontrados en KC -  $MP_{2.5}$



**Figura 3.52.** Serie de tiempo para los 3 factores encontrados en Hualqui -  $MP_{2.5}$



**Figura 3.53.** Serie de tiempo para los 4 factores encontrados en UDT -  $MP_{2.5}$



**Figura 3.54.** Serie de tiempo para los 3 factores encontrados en Consultorio -  $MP_{2.5}$