



Centro Mario Molina • Chile

Análisis de Tendencia Para Material Particulado en la Región Metropolitana (2008-2010)

Informe Final

CENTRO MARIO MOLINA CHILE

15/03/2011

Este documento contiene los resultados y análisis de tendencias de MP_{2,5} y composición elemental, medidos en Santiago (Parque O'Higgins). El análisis de tendencias comprende el período 1998-2010, siendo este documento una actualización del análisis de tendencias reportado durante el 2007.

INDICE DE CONTENIDOS

INDICE DE CONTENIDOS	1
PRESENTACIÓN	2
1 ANTECEDENTES.....	3
1.1 MARCO REGULATORIO.....	3
1.2 ÚLTIMOS HITOS MÁS IMPORTANTES EXPERIMENTADOS EN LA RM RELACIONADOS CON LA CONCENTRACIÓN DE MP.	5
1.3 OBJETIVO GENERAL	11
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
2 METODOLOGÍA.....	12
2.1 MONITOREO	12
2.2 ANÁLISIS QUÍMICOS DE FILTROS.....	12
2.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO- FACTOR DE IMPACTO DE CONCENTRACIÓN (FIC)	13
2.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO - ANÁLISIS DE FACTORES PRINCIPALES	14
3 ANÁLISIS DE TENDENCIAS	16
3.1 EVOLUCIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE MP ₁₀ Y MP _{2,5}	16
3.2 ANÁLISIS DE TENDENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA DE LA RM MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE FIC'S.	19
3.2.1 <i>Material Particulado Fino-MP_{2,5}</i>	20
3.2.1.1 FIC- Efecto año	20
3.2.1.2 FIC-Efecto mes	23
3.2.1.3 FIC-Efecto día de la semana	25
3.2.1.4 FIC-Efecto velocidad del viento	27
3.2.1.5 FIC-Efecto temperatura y humedad	27
3.2.2 <i>Material Particulado Grueso-MP_{2,5-10}</i>	29
3.2.2.1 Efecto Mes.....	29
3.2.2.2 Efecto Día de la semana	31
3.2.2.3 Efecto velocidad del viento	33
3.2.2.4 Efecto humedad y temperatura	33
4 ANÁLISIS FACTORIAL	35
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	39
ANEXO I.MUESTREADOR DICOTÓMICO DE MP	40
ANEXO II. ANÁLISIS QUÍMICO POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X.....	42

PRESENTACIÓN

El Servicio de Evaluación Ambiental ha encargado a Centro Mario Molina Chile la ejecución del estudio "Análisis de Tendencia para Material Particulado en la Región Metropolitana (2008-2010)", entidad privada que se ha adjudicado el desarrollo del proyecto bajo la Licitación N° 1287-21-LE10 durante Octubre del 2010.

En el 2007, CONAMA RM ejecutó un primer estudio denominado "Análisis retrospectivo de los impactos en la Calidad del Aire, Emisiones e Impactos en la Salud de los 10 primeros años del Plan de Descontaminación de la Región Metropolitana (1997-2007)", cuyo contenido contempló el análisis de Tendencias de concentración de Material Particulado y Gases en la RM, utilizando información extraída de la actual Red MACAM.

El presente documento corresponde a una actualización del informe aludido en el párrafo anterior al año 2010, y solamente considerando las tendencias de MP y su composición elemental.

Atendiendo a los nuevos cambios que ha experimentado el escenario ambiental chileno, este informe viene a formar parte de los antecedentes que servirán para la evaluación de las nuevas acciones implementadas por las autoridades, con especial atención a la última actualización del Plan de Prevención y Descontaminación de la RM (PPDA, D.S. 66/2009), la norma de calidad ambiental de MP_{2,5} (que comenzará a regir desde el año 2012), y norma de emisiones para centrales termoeléctricas¹.

La estructuración del informe está hecha en base a los siguientes tópicos:

- Antecedentes
- Metodología
- Análisis de Tendencias
- Conclusiones y Recomendaciones
- Anexos

¹ Información extraída desde el sitio oficial del Ministerio del Medio Ambiente. <http://www.mma.gob.cl/1257/w3-article-49843.html>

1 ANTECEDENTES

1.1 MARCO REGULATORIO

El Material Particulado (MP) está asociado con efectos adversos de la salud de las personas, razón por la cual las entidades gubernamentales de países desarrollados y en vías de desarrollo han realizado acciones para la recuperación de la calidad del aire.

La Región Metropolitana fue declarada saturada por concentración de MP₁₀, tanto estándar anual como diario (D.S N° 131/1996), dando inicio a la elaboración y promulgación de un Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (D.S 16/1998 del MINSEGPRES), y que a la fecha posee dos actualizaciones (D.S 58/2003 y D.S 66/2009, ambas por el MINSEGPRES). Estos instrumentos de gestión ambiental tienen por objetivo recuperar la calidad del aire, de acuerdo con los estándares definidos en la Norma de Calidad respectiva. A continuación se informa sobre normativa nacional e internacional, junto con recomendaciones relacionadas con la Calidad del Aire en asentamientos urbanos.

TABLA 1: NORMAS DE CALIDAD PRIMARIA DE CHILE COMPARADOS CON ESTÁNDARES DE LA EPA Y LA UNION ERUPEA Y NIVELES GUÍAS DE LA OMS.

Contaminante	Tiempo de promedio	Norma de Calidad Chilena	OMS ²	EPA ³	Unión Europea ⁴
MP ₁₀	Media 24 hrs	150 µg/m ³ N	50 µg/m ³	150 µg/m ³	50 µg/m ³ , que no podrá superarse más de 35 veces por año civil
	Media Anual	50 µg/m ³ N	20 µg/m ³	Derogada*	40 µg/m ³
MP _{2,5}	Media 24 hrs	50 µg/m ³ N	25 µg/m ³	35 µg/m ³	-
	Media Anual	20 µg/m ³ N	10 µg/m ³	15 µg/m ³	24 µg/m ³
SO ₂	Media 10 minutos	-	500 µg/m ³	-	-
	Media Horaria	-	-	196 µg/m ³	350 µg/m ³ , que no podrá superarse más de 24 veces por año civil
	Media 24 hrs	250 µg/m ³	20 µg/m ³	366 µg/m ³	125 µg/m ³ , que no podrá superarse más de 3 veces por año civil

² Guías de Calidad del Aire de la OMS Relativas al Material Particulado, el Ozono, el Dióxido de Nitrógeno, y el Dióxido de Azufre. 2005

³ www.epa.gov/air/criteria.html

⁴ Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire del ambiente y una atmósfera más limpia en Europa.

Contaminante	Tiempo de promedio	Norma de Calidad Chilena	OMS ²	EPA ³	Unión Europea ⁴
	Media Anual	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-
O₃	Media 3 hrs consecutivas	-	-	-	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (***)
	1 hora	-	-	236 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	Media móvil 8 hrs consecutivas	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (**)	147 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-
CO	Media Horaria	30.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	40.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-
	Media móvil 8 hrs consecutivas	10.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	10.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
NO₂	Media Horaria	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	188 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, que no podrá superarse más de 18 veces por año civil
	Media Anual	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

* El estándar anual de MP10 de la EPA fue derogada en el año 2007 debido a la falta de antecedentes de efectos adversos sobre la salud de las personas.

** no especifica si deben ser promedio móvil de 8 hrs consecutivas.

*** Definido como "nivel de alerta" en por la Directiva 2008/50/CE.

La nueva normativa de Calidad del Aire para MP_{2,5}, generará nuevos desafíos a considerar. A pesar que los niveles anual y diario son superiores a los establecidos por la EPA, OMS y Unión Europea, es de esperar que durante los próximos años la RM se encuentre con un número considerable de días bajo situación de preemergencia y alerta ambiental. Éstos probablemente serán desencadenados por las estaciones de Cerro Navia, Cerrillos, El Bosque y Pudahuel. Este juicio se ha realizado al observar el promedio de 24 horas móvil de concentración de MP_{2,5} en las estaciones anteriormente aludidas para el año 2010. A modo de ejemplo se entrega la situación observada para el año 2010 de la estación Cerro Navia en la Figura 1⁵.

⁵ Las situaciones de emergencia ambiental se encuentran definidas en la norma de MP_{2,5}, acorde a como sigue: 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Alerta), 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Preemergencia), 170 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Emergencia).

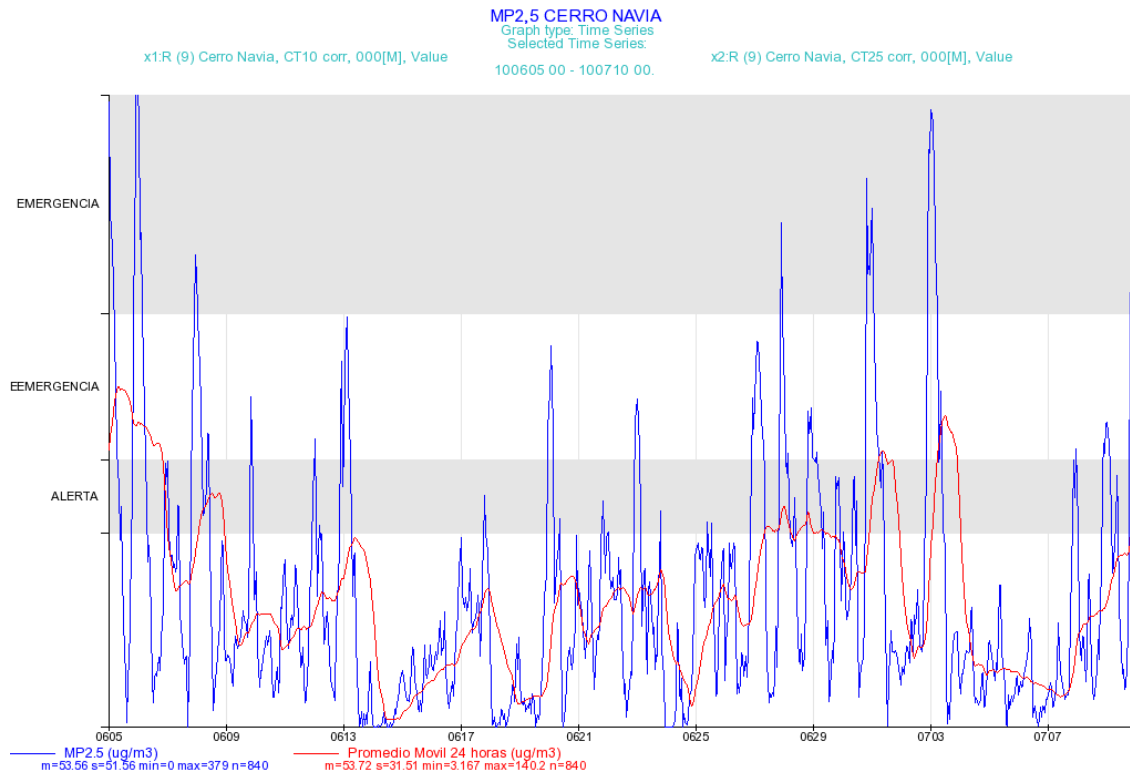


FIGURA 1: CONCENTRACIÓN HORARIA (SERIE DE COLOR AZUL) Y PROMEDIO MÓVIL DE 24 HORAS (SERIE DE COLOR ROJO) DE MP_{2,5} MEDIDO EN LA ESTACIÓN DE CERRO NAVIA. EN EL GRÁFICO TAMBIÉN SE HAN MARCADO LOS NIVELES DE ALERTA, PREEMERGENCIA Y EMERGENCIA DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN LA NORMA DE CALIDAD DE MP_{2,5}. LOS DATOS CORRESPONDEN AL PERÍODO DE 6 DE JUNIO AL 8 DE JULIO DEL AÑO 2010.

1.2 ÚLTIMOS HITOS MÁS IMPORTANTES EXPERIMENTADOS EN LA RM RELACIONADOS CON LA CONCENTRACIÓN DE MP.

Importantes cambios ha experimentado la Región Metropolitana durante los 10 últimos años. La velocidad del crecimiento del parque vehicular privado tiende a acelerarse durante los últimos cinco años, especialmente los vehículos livianos (motocicletas y automóviles), según como lo muestra las estadísticas del INE en la Figura 2. Por otra parte la reforma del transporte público Transantiago que comenzó a fines del año 2005 implicó en modificaciones importantes en el número y tecnología de los buses, lo que consistió en el progresivo retiro de buses Euro I y Euro II por nuevos vehículos de tecnología Euro III. Para los próximos años se espera la introducción de tecnología de EURO III con filtros acorde como se observa en la Figura 3.

Evolucion del Parque Vehicular de la RM

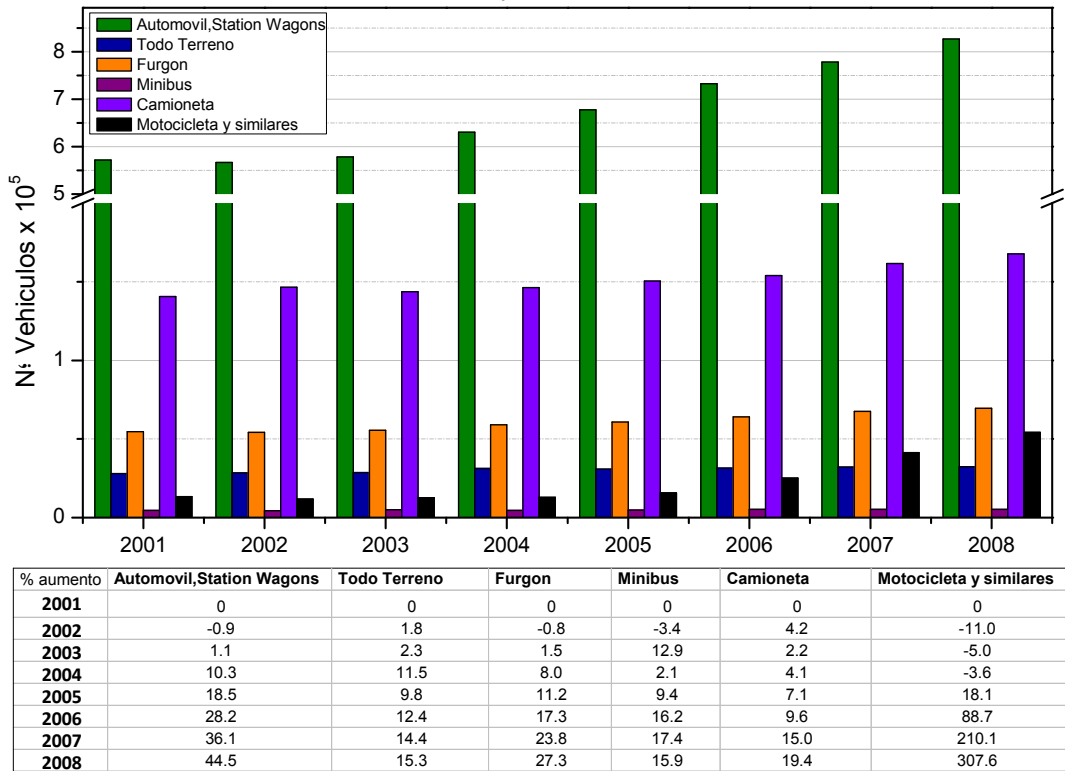


FIGURA 2: EVOLUCIÓN DEL PARQUE VEHICULAR PRIVADO EN LA REGIÓN METROPOLITANA (GRÁFICO DE BARRAS). EN LA TABLA ADJUNTA SE MUESTRA EL AUMENTO ANUAL CON RESPECTO AL AÑO 2001. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS DEL INE.

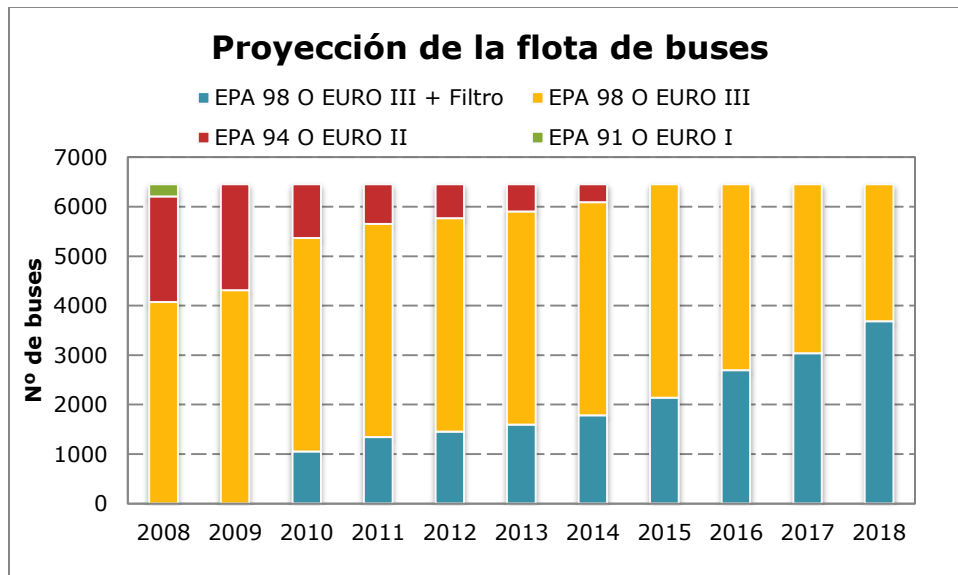


FIGURA 3: PROYECCIÓN DE LA FLOTA DE BUSES DE TRANSANTIAGO. FUENTE: ESTUDIO "DISEÑO INTEGRAL DE UN SISTEMA DE COMPENSACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS PARA LA REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO" ELABORADO POR CENTRO MARIO MOLINA CHILE PARA EL PROGRAMA DE NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO. 2009.

Otro aspecto a considerar en las tendencias de la RM consiste en evaluar la evolución que ha presentado la matriz de combustibles que se expande en la RM. Un resumen de la tendencia se entrega en la Figura 4. En términos generales es posible evidenciar un crecimiento importante de las ventas de petróleos, gasolina, kerosene y diesel a contar de inicios del año 2007, pasando de cerca de 250000 m³ durante inicios del 2006 a casi 420000 m³ en agosto 2007. Solo a contar del 2009 se experimenta un leve descenso en torno a los 350000 m³.

Una situación opuesta experimentó el Gas Natural, cuya mayor depresión se observó entre enero 2008 y julio 2009, con un promedio bajo los 20000 Mm³. Solo durante fines del año 2009 se observa una reactivación de aproximadamente el doble. La razón más directa entre el crecimiento del petróleo combustible y el descenso en el gas natural estuvo en las restricciones de suministro desde Argentina.

Por último la evolución del gas licuado de petróleo indica una clara estacionalidad, con mayores ventas durante los meses de invierno. Este comportamiento se debe a que este tipo de combustible es esencialmente de uso residencial.

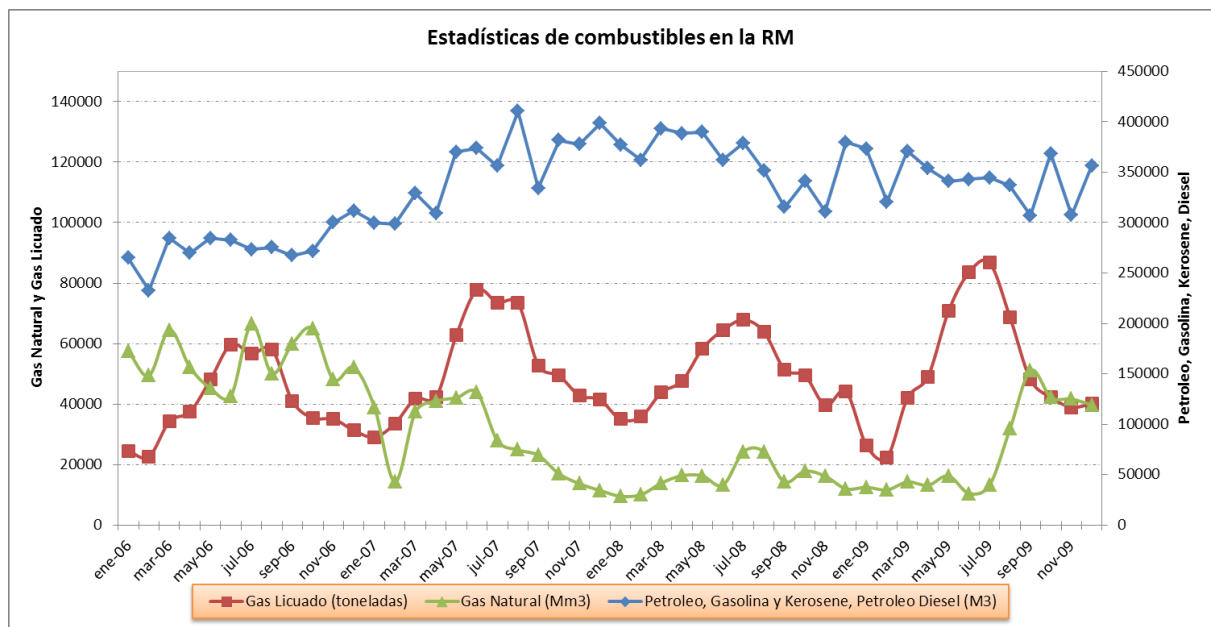


FIGURA 4: ESTADÍSTICAS DE COMBUSTIBLES EXPENDIDOS EN LA RM. LA SERIE DE PETRÓLEO, GASOLINA, KERÓSENE Y DIESEL⁶ CORRESPONDE A LAS VENTAS TOTALES DE COMBUSTIBLE DE ENAP Y COMPAÑÍAS DISTRIBUIDORAS. LA SERIE DE GAS LICUADO CORRESPONDE A LAS VENTAS EN LA RM. LA SERIE DE GAS NATURAL CORRESPONDE AL VALOR DISTRIBUIDO EN LA RM. DATOS EXTRAÍDOS DESDE LA SUBSECRETARÍA DE ELECTRICIDAD Y COMBUSTIBLES. ELABORACIÓN PROPIA.

⁶ Esta serie corresponde a la suma de las ventas en la RM de Gasolina de 93, 95, 97 octanos, Gasolina y Kerosene de aviación, Kerosene doméstico, Petróleo combustible (N° 180, 5 y 6), Petróleo Diesel (A1, A2, B, e Invernal), conforme con las clasificaciones de las bases de datos.

Una de las medidas más importantes de la actualización del PPDA RM 2003 consistió en la desulfuración del combustible para la RM (hasta un nivel actual de 50 ppm), y el retiro del plomo en las gasolinas. Hoy en día en la RM se expande combustible limpio de estándar internacional (Figura 5).

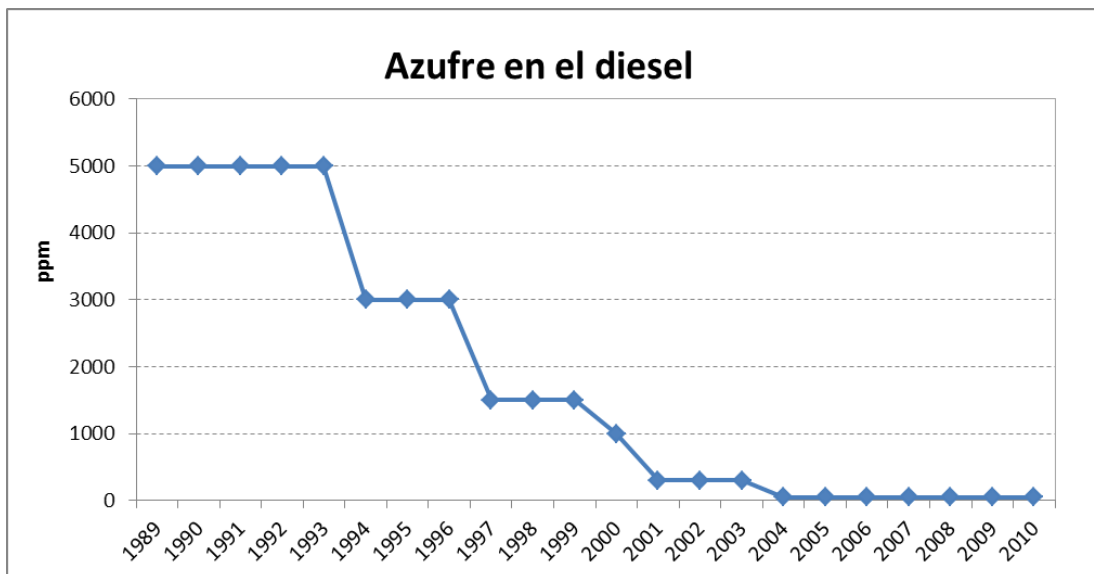


FIGURA 5: EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE AZUFRE EN EL DIESEL EXPENDIDO EN LA RM.

Una publicación científica reciente⁷ estudió la evolución de las principales fuentes emisoras en base a la aplicación de un modelo receptor (análisis factorial) sobre los resultados de elementos medidos en Parque O'Higgins para los años 1998-2007. Los resultados permitieron discernir cinco fuentes: suelo, motores vehiculares, aceites residuales, aerosol marino y sulfatos secundarios tal como es mostrado en la Tabla 2.

⁷ Modification in the soil and traffic-related source of particle matter between 1998 and 2007 in Santiago de Chile. F. Moreno, E. Gramsch, P Oyola, M.A. Rubio (2010). Journal of the Air & Waste Management Association. In Press.

TABLA 2: PONDERACIÓN PROMEDIO DE LAS CARGAS DE MP_{2,5} (1998-2006) PARA LOS ESTIMADA POR MEDIO DE ANÁLISIS DE FACTORES.

Element	PM _{2,5}				
	Soil	Motor Vehicles	Residual Oil	Sulfates	Marine Aerosols
Al	0.9763	0.0097	-0.0707	-0.03806	-0.0014
As	0.1701	0.2354	0.0157	0.54901	
Ba	0.0839	0.0304	0.053	-0.03502	
Br	-0.031	0.8283	0.0172	0.02263	0.030439
Ca	0.7362	0.0632	0.1724	-0.00701	0.119266
Cl	-0.0069	0.3923	0.0869	-0.19173	0.253382
Cu	0.103	0.0701	0.4489	0.08408	-0.17211
Fe	0.4636	0.1123	0.4352	0.01354	0.039583
K	0.3023	0.4422	-0.0434	0.16289	0.216127
Mn	0.0789	0.0299	0.8065	-0.02844	0.191805
Na	0.0311	0.0621	0.0438		0.904273
P	0.0181	-0.0211	0.0669	0.97644	
Pb	0.0818	0.4353	0.2481	0.02911	-0.19394
S	-0.0338	0.0887	0.0111	0.93597	-0.05768
Se	-0.174	0.193	-0.022	0.39997	
Si	0.9293	-0.0196	0.0499	0.01175	0.006237
Sn	0.0949	-0.1073	-0.0564		
Ti	0.7458	0.0014	0.1863	0.01372	
Zn	0.0489	0.0686	0.4427	0.09136	-0.01562
Average loading (%)	24.6	12.3	13.6	13.6	

El factor "suelo" corresponde a aproximadamente el 24.6% del MP_{2,5}, sin embargo como es observado en la Figura 6 existe un aporte mínimo durante el año 2002 producto de concentración de lluvias dos veces por sobre lo usualmente reportado en la RM (551.9 mm de mayo a julio). El crecimiento del aporte de este factor entre los años 2003-2007 (17.8% anual) se puede deber a dos razones, una es el crecimiento del parque vehicular que aporta como polvo resuspendido y la segunda es el incremento de las emisiones provenientes de fuentes de construcción, acorde a como es observado en la Figura 7.

EL FACTOR "MOTORES VEHICULARES" EXPLICA APROXIMADAMENTE EL 12% DE LA VARIABILIDAD DE LOS DATOS. ES POSIBLE EXTRAER DOS TENDENCIAS DIFERENTES, LA DESDE 1998-2000 CON ALTO PESO EN EL APORTE DE PB, Y EL ÚLTIMO ENTRE 2001-2005 CON MUCHA MENOS INFLUENCIA DEL PB, LO QUE ES EXPLICADO POR EL RETIRO DEL PLOMO EN LAS GASOLINAS (

Figura 8). Este factor también obedece a la introducción de vehículos catalíticos en la RM.

El factor aceite residual explica aproximadamente el 14% de la variabilidad del MP_{2,5}, e incluye lubricantes y diesel de motores (Figura 9). El comportamiento de este factor obedece a la introducción de tecnologías más limpias y normas de composición del diesel y la gasolina en Santiago.

La fuente de "sulfatos" explican entre un 15 a 20%, mostrando un comportamiento estacional durante el año (Figura 10). Las emisiones de SO₂ se encuentran en este factor, esto es la combustión de los diesel en los motores

vehiculares, generadores y otros motores. También son importantes tres refinерías cercanas a Santiago).

Los aerosoles marinos se agrupan en un último factor y pueden ser identificados debido a la estacionalidad que presentan y su alta ponderación en Cl y Na. El incremento en la velocidad del viento durante verano hace que las masas de aire costeras tengan mayor facilidad para ingresar a la Región Metropolitana.

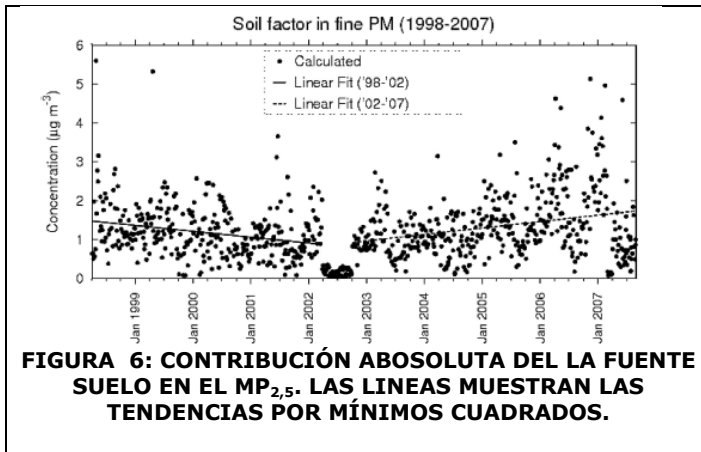


FIGURA 6: CONTRIBUCIÓN ABSOLUTA DEL LA FUENTE SUELO EN EL MP_{2,5}. LAS LINEAS MUESTRAN LAS TENDENCIAS POR MÍNIMOS CUADRADOS.

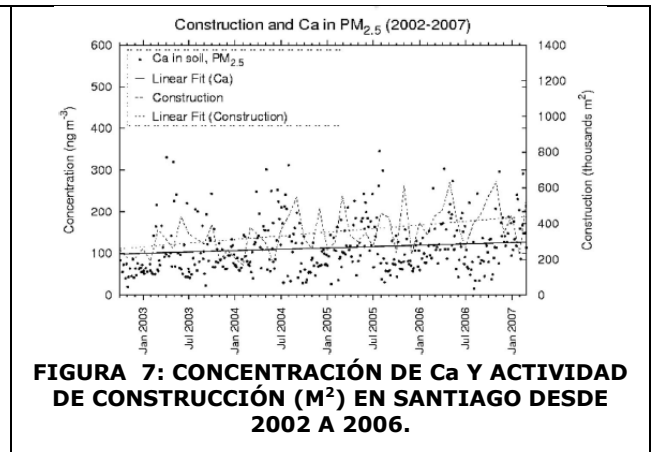


FIGURA 7: CONCENTRACIÓN DE Ca Y ACTIVIDAD DE CONSTRUCCIÓN (M²) EN SANTIAGO DESDE 2002 A 2006.

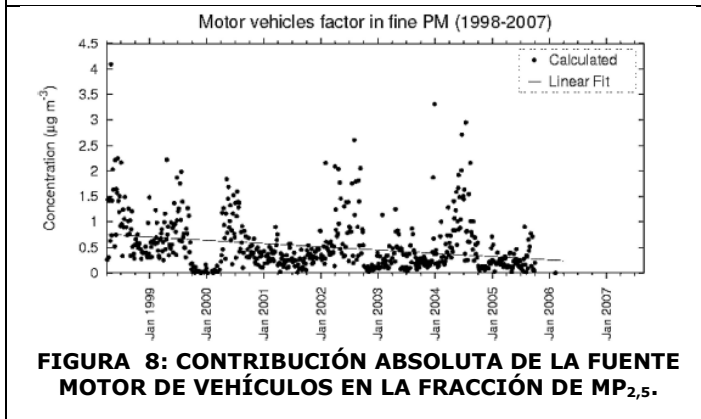


FIGURA 8: CONTRIBUCIÓN ABSOLUTA DE LA FUENTE MOTOR DE VEHÍCULOS EN LA FRACCIÓN DE MP_{2,5}.

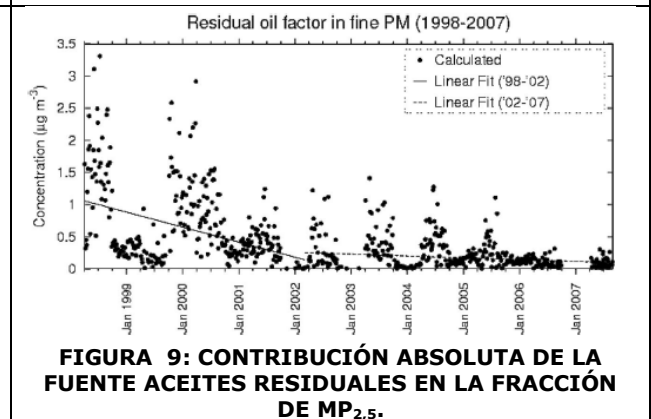


FIGURA 9: CONTRIBUCIÓN ABSOLUTA DE LA FUENTE ACEITES RESIDUALES EN LA FRACCIÓN DE MP_{2,5}.

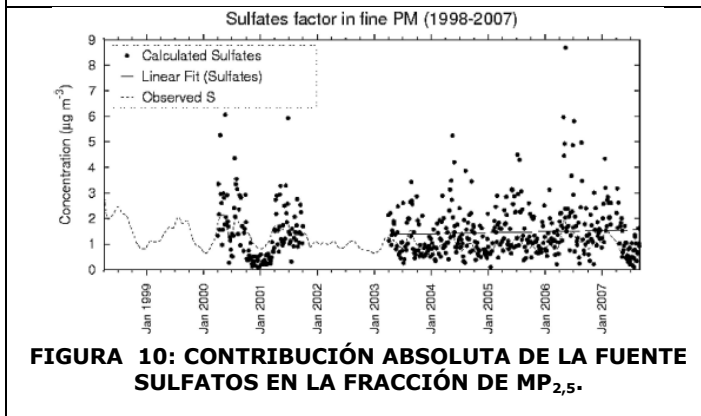


FIGURA 10: CONTRIBUCIÓN ABSOLUTA DE LA FUENTE SULFATOS EN LA FRACCIÓN DE MP_{2,5}.

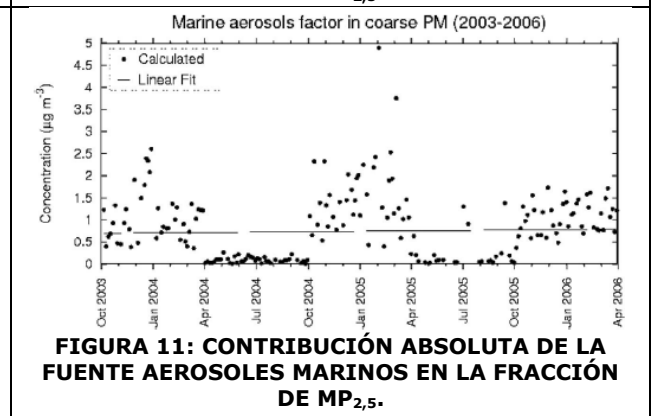


FIGURA 11: CONTRIBUCIÓN ABSOLUTA DE LA FUENTE AEROSOL MARINOS EN LA FRACCIÓN DE MP_{2,5}.

1.3 OBJETIVO GENERAL

Generar antecedentes técnicos mediante la realización de la caracterización fisicoquímica de material particulado fino y grueso en el sector de Parque O'Higgins de la Región Metropolitana, entre los años 2008 y 2010, integrando resultados con la información obtenida por estudios y/o campañas paralelas, con el fin de identificar la responsabilidad relativa en las concentraciones de material particulado de las fuentes que le impactan, de manera de apoyar el seguimiento de la evolución de la calidad del aire por material particulado en la Región Metropolitana asociado a la implementación del PPDA.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar fisicoquímicamente los filtros históricos de material particulado fino y grueso desde el año 2008 al 2010 para la estación Parque O'Higgins.
- Indicar las fuentes de mayor contribución de material particulado primario en las fracciones fina y gruesa.
- Establecer un análisis de tendencias de material particulado fino que incluya los resultados anteriores de la primera etapa desde 1998.
- Análisis de la evolución de las emisiones y la participación de los diferentes sectores en la calidad del aire.
- Implementar un análisis de factores absolutos principales.
- Determinar las concentraciones y distribución del aporte de las fuentes de material particulado fino, de acuerdo a los resultados obtenidos.
- Generación de un documento de los análisis obtenidos.

2 METODOLOGÍA

Para este estudio se conservó la metodología histórica descrita en estudios anteriores, concernientes a caracterización elemental del material particulado⁸, la que a continuación se describe resumidamente.

2.1 MONITOREO

Filtros de teflón de 37 mm se utilizaron para capturar muestras de MP_{2,5} y MP₁₀ en la estación MACAM Santiago (Parque O'Higgins), utilizando un muestreador dicotómico. Cada filtro tiene exposición de 24 hr (medianoche – medianoche) y la concentración en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ fue determinada por gravimetría en laboratorios nacionales.

El recambio de filtros en base a los criterios siguientes:

1. La sustitución de las muestras se realizó para todos los días durante el período de invierno (Abril a Septiembre) y día por medio en el verano (Octubre a Marzo).
2. Las entradas de aire estaban ubicadas a 3 m del suelo.
3. Antes de comenzar con el monitoreo se verificó la integridad de cada filtro.
4. Los filtros muestreados fueron almacenados en compartimentos de temperatura y humedad controlada, para el pesaje con una micro-balanza con resolución de ± 0.01 mg.
5. Una vez determinada la concentración de MP₁₀ y MP_{2,5}, los filtros fueron enviados al extranjero para análisis elemental.

Todos los filtros fueron facilitados por la Autoridad Sanitaria de la Región Metropolitana, entidad a cargo del manejo de la Red MACAM.

Datos de meteorología (velocidad y dirección del viento, humedad y temperatura) fueron extraídos de la estación La Paz. Los vacíos de información se completaron con datos de la estación de Parque O'Higgins.

2.2 ANÁLISIS QUÍMICOS DE FILTROS

Para cada mes, solo 6 a 8 filtros de MP_{2,5} fueron seleccionados para análisis elemental, tomando una muestra cada cuatro días (como ejemplo observar la Tabla 3). Durante invierno se priorizaron aquellos filtros próximos a episodios de contaminación.

La frecuencia de selección de filtros de material particulado grueso fue cada ocho días.

⁸ Trends in the Elemental Composition of Fine Particulate Matter in Santiago, Chile, from 1998 to 2003", Sonja N. Sax, et.al., JAWMA, 2007.

TABLA 3: EJEMPLO DE SELECCIÓN DE FILTROS DE MP FINO.

Agosto 2009						
DOM	LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SÁB
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31					

El análisis de composición elemental de los filtros se ejecutó en el DRI (Desert Research Institute, Reno, NV, USA). Las muestras fueron analizadas por fluorescencia de rayos X.

Como criterio de aceptabilidad de los resultados obtenidos de análisis elemental se utilizó la incerteza reportada para cada elemento en cada muestra. De los datos obtenidos sólo se consideró para el análisis de estadístico aquellos elementos en que al menos el 75% de las muestras tengan valores de concentraciones de al menos 2 veces la incerteza reportada.

Dentro del periodo 01 de Agosto del 2008 al 31 de Agosto del 2010 se seleccionaron 179 filtros de MP fino y 88 de MP grueso.

2.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO- FACTOR DE IMPACTO DE CONCENTRACIÓN (FIC)

Se estudió la relación entre la concentración de $MP_{2.5}$ y $MP_{2.5-10}$ y los elementos con variables meteorológicas y temporales usando modelos de regresión lineal de modo de identificar factores específicos que influyen las concentraciones de partículas y cuantificar su impacto relativo.

El modelo de regresión incluye información de años, mes, día de la semana y meteorología (velocidad de viento, temperatura y humedad relativa) como variables categóricas. Los datos meteorológicos continuos fueron dicotomizados o tricotomizados.

Dado que la concentración de partículas en masa y de elementos se distribuyen siguiendo una función logarítmica normal, las concentraciones se transforman aplicando el logaritmo natural. Luego, el modelo de regresión múltiple se construyó usando las variables categóricas como variables independientes y el logaritmo natural de las concentraciones como variable dependiente como se detalla en la ecuación:

$$\ln[PM] = a + \sum \beta_{yj} * y_j + \sum \beta_{mj} * m_j + \sum \beta_{wj} * w_j + \sum \beta_{wsj} * ws_j + \sum \beta_{tmpj} * tmp_j + \sum \beta_{rhj} * rh_j$$

Donde, a es el intercepto de la regresión y β_{yj} , β_{mj} , β_{wj} , β_{wsj} , β_{tmpj} , y β_{rhj} son los coeficientes de regresión de las variables independientes año, y_j , ($j=1$ a 5), mes, m_j , ($j=1$ a 12), día de la semana, w_j , ($j=1$ a 7), velocidad de viento, ws_j , ($j=1$ a 3), temperatura, tmp_j , ($j=1$ a 2) y humedad relativa, rh_j , ($j=1$ a 2). Basado en esta ecuación, las concentraciones de partículas pueden ser expresadas como el producto de de términos exponenciales múltiples que pueden ser expresados como el producto de varios términos exponenciales, como se detalla en forma simplificada en la siguiente ecuación:

$$[MP] = I * f_{*añorj} * f_{meshj} * f_{díayj} * f_{wsj} * f_{tmpj} * f_{rhj}$$

Donde, $f_{ij} = \exp[\sum \beta_{ij} * var_{ij}]$ es el factor de impacto en la concentración (FIC) de la variable i (ej: año) de la categoría j (Ej: 1998/1999).

Para cada una de las variables categóricas se seleccionó un valor de referencia, y los efectos de las otras categorías fueron calculados relativo a esta variable.

El FIC del intercepto, $I = e^a$, corresponde a la concentración esperada para el valor de referencia según Sax S. N. et al, 2007⁹ (Diciembre, Sábado, velocidad de viento ≥ 1.6 m/s, humedad relativa $\geq 70\%$ y temperatura ≥ 20 °C).

Para las otras variables, un FIC de 1 significa que la variable no tiene efecto. Por el contrario, un FIC mayor que 1 representa una concentración mayor que el valor de referencia y un valor menor a 1 representa una concentración menor. Un FIC de 2 equivale al doble del valor de concentración referencial (FIC igual a 1).

Importante hacer notar que el concepto de FIC tiene un efecto multiplicativo y no aditivo. La significancia de la asociación se determinará por los valores p de los estimados.

Los resultados de regresión son discutidos en términos de sus FICs, para facilitar la comparación de niveles de concentraciones a través de diferentes parámetros.

2.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO - ANÁLISIS DE FACTORES PRINCIPALES

El análisis de factores se llevó a cabo siguiendo el método descrito por Thurston et al.¹⁰ Esta rotación oblicua se eligió de modo de permitir que los factores pudieran tener cierta correlación entre ellos, lo cual es esperable en una ciudad como Santiago.

⁹ Trends in the Elemental Composition of Fine Particulate Matter in Santiago, Chile, from 1998 to 2003, Volume 57 July 2007, Journal of the Air & Waste Management Association.

¹⁰ A Quantitative Assessment of Source Contributions to Inhalable Particulate Matter Pollution in Metropolitan Boston. Atmospheric Environment, 1985.

El modelo arrojó 5 factores. Para cada día se calculó un "puntaje" para cada factor el cual fue escalado considerando las concentraciones.

Para estimar la contribución de cada una de los factores a las concentraciones de $MP_{2,5}$ se realizó una regresión múltiple entre los "puntajes" de los factores para cada muestra como variables independientes y el valor de $MP_{2,5}$ para esa muestra como valor dependiente.

Las contribuciones diarias fueron calculadas al multiplicar el "puntaje" diario para cada factor y las pendientes estimadas mediante la regresión múltiple.

Los perfiles de composición para cada fuente fueron calculados por regresión múltiple entre las concentraciones de los elementos como variable independiente y las contribuciones diarias (en términos de $MP_{2,5}$) para cada factor como variable dependiente.

Se seleccionaron para análisis aquellos elementos en que al menos el 80% de las muestras tuvieran concentraciones que fueran al menos 3 veces el nivel de insertes reportada.

3 ANÁLISIS DE TENDENCIAS

3.1 EVOLUCIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE MP₁₀ Y MP_{2,5}

Solamente tres estaciones de la Red MACAM poseen muestreador dicotómico (Parque O'Higgins, Las Condes y La Paz) y conforman la base de datos histórica de mayor extensión de concentración de MP fino y grueso en la RM.

La evolución del promedio anual se muestra en la Figura 12, para las tres fracciones de MP. El análisis sólo se realiza hasta el año 2009, debido a que hasta la redacción de este informe el año 2010 se encontraba incompleto (solo hasta el mes agosto), y por lo tanto no puede ser utilizado para evaluar el cumplimiento de la norma de calidad del aire para el último año.

Tanto la concentración anual de MP₁₀ como la de MP_{2,5} muestran un descenso progresivo hasta el año 2004. El cumplimiento de normativa de calidad requiere el promedio aritmético trianual, y para esto se ha utilizado el período 2007-2009 (Tabla 4). La concentración de MP₁₀ es 1,03 – 1,36 veces el límite nacional, y 2,8-3,6 veces la recomendación OMS, indicando condiciones de saturación.

En la misma Tabla 4 se ha incorporado el análisis para MP_{2,5}, solo a modo de referencia, debido a que comienza a regir a contar del año 2012. Para el período 2007-2009 las concentraciones anuales son 1,2-1,6 veces la norma anual chilena; 1,6-2,1 veces la norma EPA y 2,9-3,2 veces la recomendación de la OMS. Este análisis permite aventurar el juicio que en caso de mantenerse los niveles de concentración de MP_{2,5} durante los próximos tres años, las RM estará saturada tanto por MP_{2,5} como por MP₁₀.

TABLA 4: PROMEDIO ARITMÉTICO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) TRIANUAL DE LOS PROMEDIOS ANUALES 2007-2009 DE MP₁₀ Y MP_{2,5}.

Fracción	La Paz	Parque O'Higgins	Las Condes	Norma Chilena	OMS	EPA
MP _{2,5}	30,9	31,87	23,82	20*	10	15
MP ₁₀	67,9	72,82	51,58	50	20	---

* La norma de MP_{2,5} comienza a regir el 2012.

Vale la pena comentar que la evolución del MP_{2,5-10} no presenta una tendencia clara a contar del año 2000.

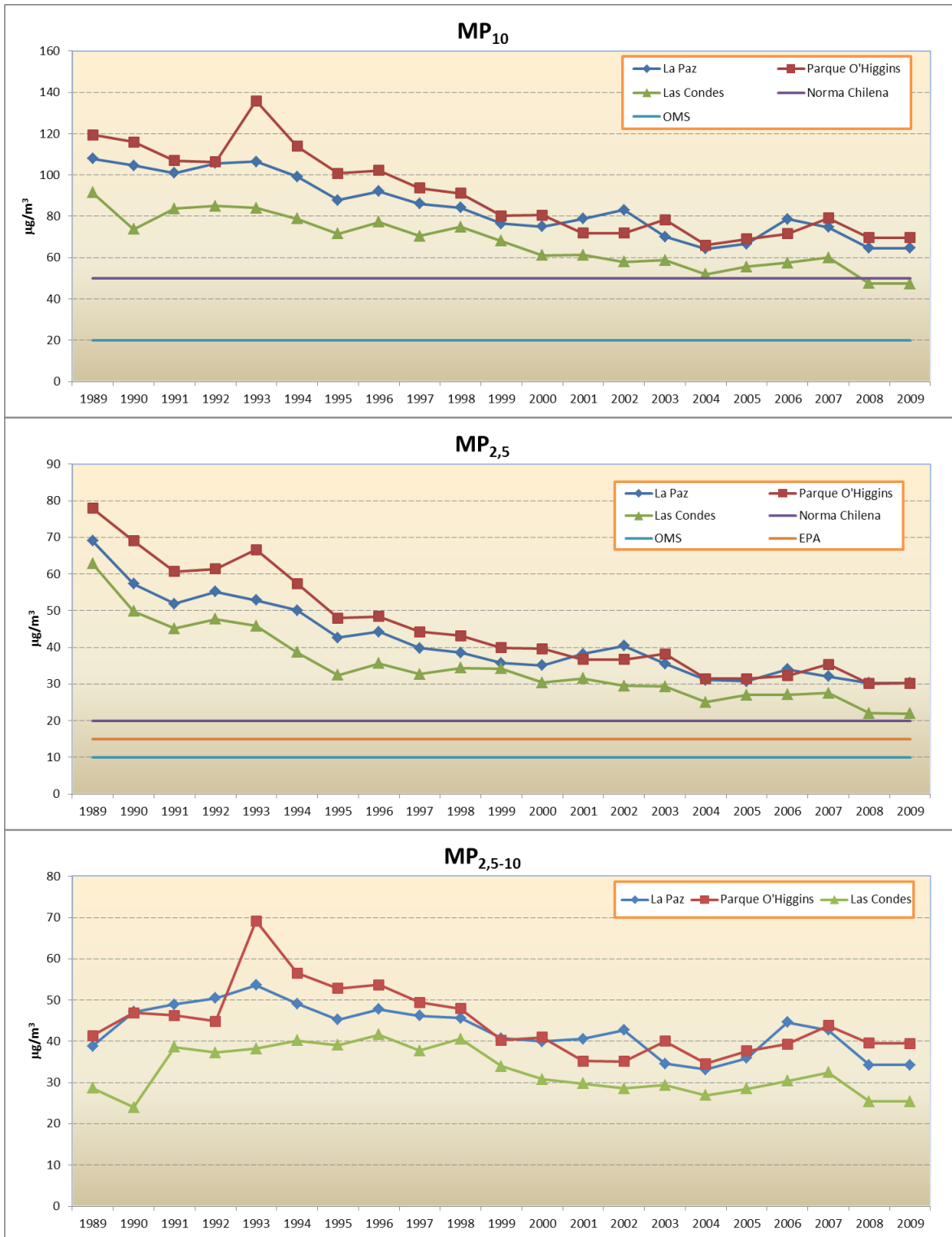


FIGURA 12: PROMEDIOS ANUALES DE CONCENTRACIÓN DE MP₁₀, MP_{2,5}, Y MP_{2,5-10} (MUESTREADOR DICOTÓMICO). LA NORMA CHILENA DE MP_{2,5} COMIENZA A REGIR DESDE EL AÑO 2012.

La situación para el percentil 98 de las concentraciones de 24 horas MP_{10} y $MP_{2,5}$ es mostrada en la Figura 13, y es comparada con la norma Chilena, Norma EPA y recomendación OMS. En ambas fracciones se observan condiciones de saturación durante el período 2007-2009. La concentración de MP_{10} supera 1,21 veces la norma nacional y EPA, 3,63 veces la recomendación OMS (en el caso de Parque O'Higgins). La concentración de $MP_{2,5}$ es 2,02 veces la norma nacional, 2,89 veces el estándar EPA y 4,05 veces la recomendación OMS.

TABLA 5: PROMEDIO ARITMÉTICO TRIANUAL ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) DEL PERCENTIL 98 DE LAS CONCENTRACIONES DE 24 HORAS PARA EL PERÍODO 2007-2009 DE MP_{10} Y $MP_{2,5}$.

	La Paz	Parque O'Higgins	Las Condes	Norma Chilena	OMS	EPA
$MP_{2,5}$	89,8	101	68,2	50*	25	35
MP_{10}	155	181	112	150	50	150

* La norma de $MP_{2,5}$ comienza a regir el 2012.

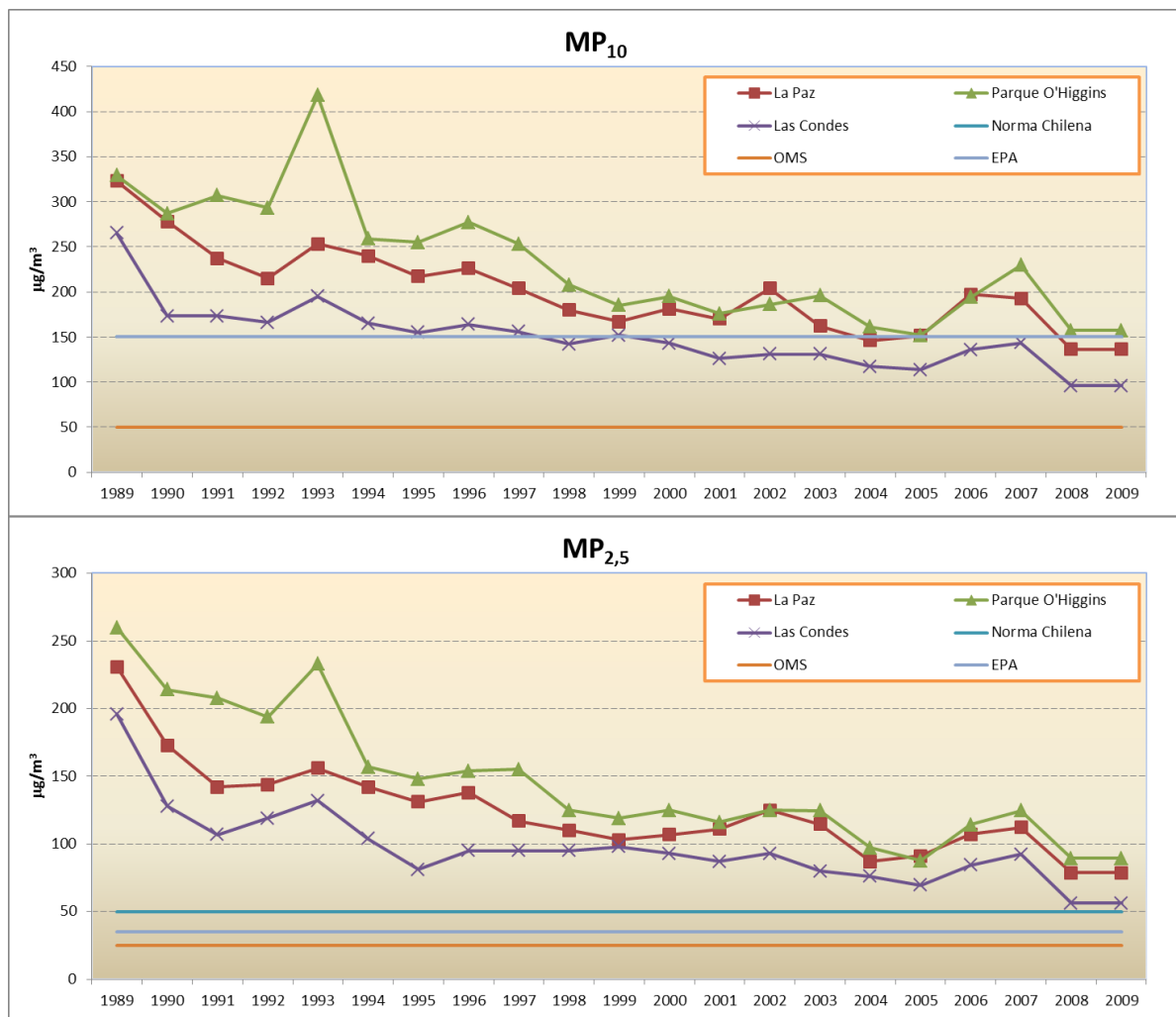


FIGURA 13: EVOLUCIÓN DEL PERCENTIL 98 DE LA CONCENTRACIÓN DE MP_{10} Y $MP_{2,5}$ (MUESTREADOR DICOTÓMICO). LA NORMA CHILENA DE $MP_{2,5}$ COMIENZA A REGIR DESDE EL AÑO 2012.

3.2 ANÁLISIS DE TENDENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA DE LA RM MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE FIC'S.

Para una adecuada comparación de las concentraciones de contaminantes debe efectuarse una corrección, mediante herramientas estadísticas de factores como la meteorología, variable año tras año. Así se obtiene una independencia del valor exacto de concentración deducido.

Para efectos del análisis de tendencias, se ha conservado la metodología en base a la utilización de Factores de Impacto de Concentración (FIC), el cual indica la importancia de la variable (año, día de la semana) en las concentraciones obtenidas. Este valor adimensional indica cuánto más alta (más baja) es la concentración de un contaminante en el aire, con relación a un valor de referencia (valorado como 1).

La ventaja de la utilización de estos factores radica en que se obtienen resultados aislados del efecto de la meteorología, lo que permite una comprensión más fidedigna de la evolución del problema de calidad de aire que al usar los promedios anuales.

Para cada variable se han definido los siguientes valores como referencia (Tabla 6).

TABLA 6: DEFINICIÓN DE VALORES DE REFERENCIA PARA LA INTERPRETACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE IMPACTO DE CONCENTRACIÓN.

VARIABLE	VALOR DE REFERENCIA	COMENTARIO
Año	2009-2010	Se ha aplicado el modelo considerando dos semestres: Cálido (desde octubre hasta marzo) y Frío (desde abril hasta septiembre). Es por esto que el análisis de tendencias se realiza en base a períodos catalogados como $YYYY_i-YYYY_{i+1}$. Todos los valores deben ser comparados con respecto al período 2009-2010.
Mes	Diciembre	Los valores mensuales de FIC son comparados con respecto al mes de diciembre.
Día de la Semana	Sábado	Los valores diarios de FIC son comparados con respecto al día sábado.
Velocidad del viento (ws)	$ws \geq 1,6 \text{ m/s}$	Los promedios diarios (24 horas) de velocidad del viento se han tricotomizado: $ws \geq 1,6 \text{ m/s}$; $0.8 \text{ m/s} \leq ws < 1,6 \text{ m/s}$; $ws \leq 0.8 \text{ m/s}$. El efecto de velocidad significa cuánto más alto/bajo

VARIABLE	VALOR DE REFERENCIA	COMENTARIO
		es la concentración de un contaminante a un umbral de velocidad determinado, con relación a cuando el promedio diario de es mayor que 1,6 m/s.
Temperatura (Tº)	Tº ≤ 20 ºC	Los promedios diarios de temperatura (24 horas) de temperatura se han dicotomizado: Tº > 20 ºC; Tº ≤ 20 ºC. El efecto de temperatura significa cuánto más alto/bajo es la concentración de un contaminante a un umbral de temperatura determinado, con relación a cuando la temperatura es menor que 20ºC.
Humedad Relativa (RH)	RH < 70%	Los promedios diarios humedad relativa (24 horas) se han dicotomizado: Tº ≥ 70%; Tº < 70%. El efecto de humedad significa cuánto más alto/bajo es la concentración de un contaminante a un determinado umbral de humedad, con relación a cuando la humedad es menor que 70%.

A continuación se presenta el efecto aislado por cada variable considerada en la Tabla 6.

3.2.1 MATERIAL PARTICULADO FINO-MP_{2,5}

3.2.1.1 FIC- EFECTO AÑO

El MP_{2,5} presenta una tendencia hacia la reducción durante todo el período de análisis. La tendencia se pierde durante los períodos 2006-2007 y 2007-2008, período en el cual distribución de Gas Natural en la RM decae considerablemente y aumenta el consumo de petróleos (Figura 4). La tendencia a la baja de MP_{2,5} se recupera durante el período 2008-2009, en paralelo con el aumento de la utilización de gas natural. Durante los meses de invierno de los años 2006, 2007 y 2008 se encuentran las concentraciones más altas de SO₂ medidas en Parque O'Higgins, y los elementos S, K, Cr, Mn, Ca también muestran un incremento apreciable en paralelo con el MP_{2,5}. El S, Cr, Zn pueden ser relacionados con petróleos combustibles, combustibles pesados y actividad industrial respectivamente, explicando parcialmente el reemplazo del gas

natural. El Mn fue relacionado anteriormente con la utilización de aceites residuales (Tabla 2).

Es posible observar elementos que presentan una reducción considerable durante los tres primeros períodos, esto es el Br y Pb, los que obedecen al retiro de los aditivos a la gasolina (la prohibición comenzó a regir en el año 2001). Ya a contar del período 2004-2005 no se aprecia una variación considerable.

El Al y el Si presentan tendencias semejantes, y anteriormente fueron se relacionaron con el polvo resuspendido (Tabla 2). Los bajos FIC's presentados durante el período 2002-2003 y 2003-2004 son consecuencia de concentración de precipitaciones sobre lo normal informado en la sección de antecedentes. Se observa también que el efecto de las precipitaciones no tiene fuerza en el $MP_{2,5}$.

El aumento de Calcio a contar del período 2002-2003 tiene relación con el incremento de las actividades de construcción (Figura 7).

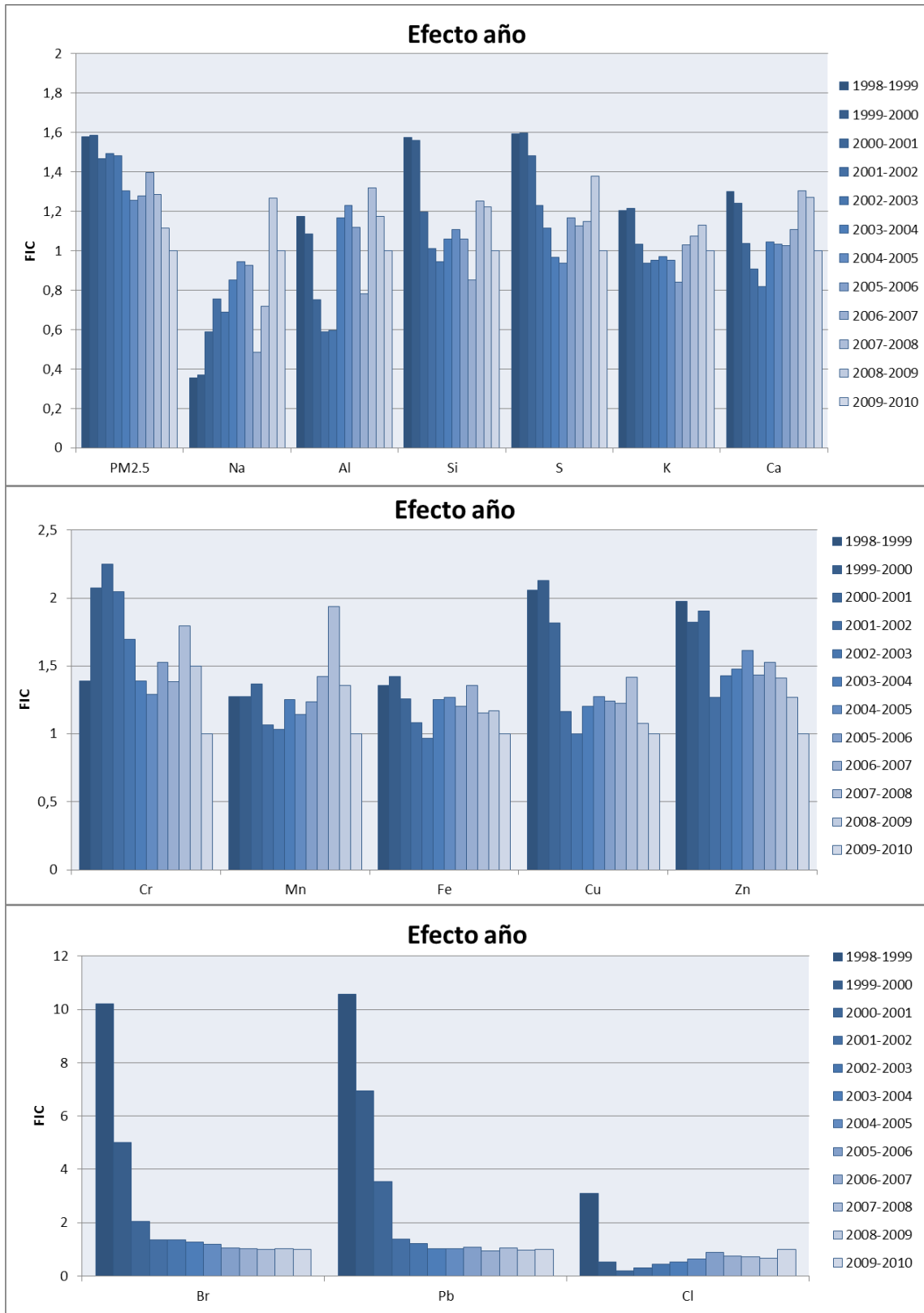


FIGURA 14: FACTORES DE IMPACTO DE CONCENTRACIÓN (FIC) $MP_{2,5}$ Y ELEMENTOS MEDIDOS EN PARQUE O'HIGGINS. EFECTO AÑO.

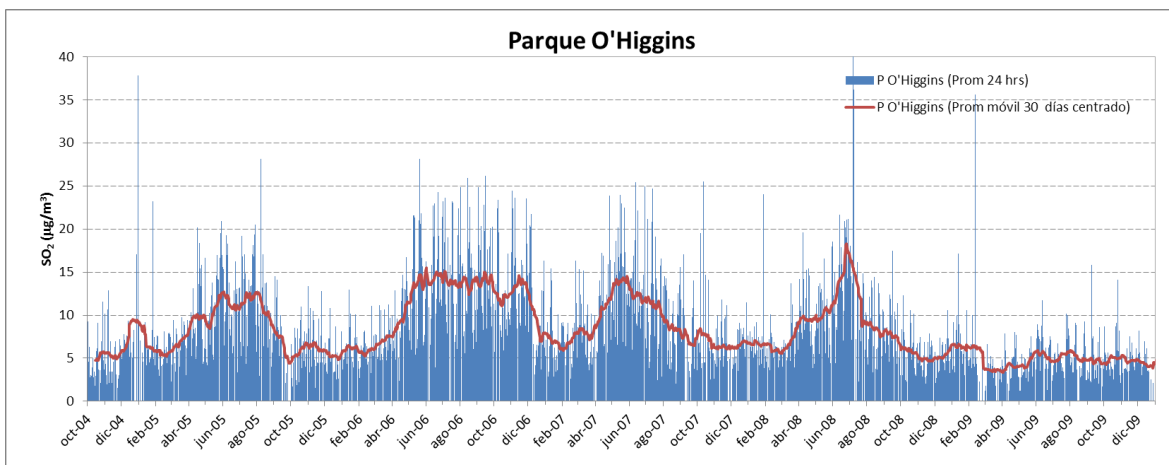


FIGURA 15: CONCENTRACIONES DE SO₂ MEDIDAS EN PARQUE O'HIGGINS. LAS BARRAS INDICAN PROMEDIOS DIARIOS, LA LINEA INDICA PROMEDIO MÓVIL DE 30 DÍAS CENTRADO.

3.2.1.2 FIC-EFECTO MES

De acuerdo con su comportamiento anual, es posible encasillar los elementos en dos grupos, unos que presentan aumentos significativos en invierno y otros con aumentos leves o insignificantes. Esto no quiere decir que provengan de una misma fuente, sino que más bien obedecen a condiciones meteorológicas, especialmente relacionados con la disponibilidad de humedad y concentración de precipitaciones.

El primer grupo caracterizado por un fuerte incremento durante los meses de invierno, a saber MP_{2,5}, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, Br, Pb y Cl. Las concentraciones en invierno de este grupo de elementos puede alcanzar los 2.5 a 4.5 veces las medidas en verano. Estos elementos se relacionan más bien con actividades antropogénicas de transporte, quema de combustibles e industrias.

Un segundo grupo de elementos está caracterizado por un leve incremento de concentraciones durante el período frío, a saber S, K, y Ca. Las concentraciones en invierno aumentan entre 1.5 a 2 veces las medidas en verano. Estos elementos presentan alta solubilidad en agua, mostrando mayores descensos solo durante los meses de Junio y Julio (especialmente el S). Los aumentos del K durante el mes de abril pueden tener relación con las quemadas agrícolas, esto a pesar que el K⁺ es el trazador de leña, no el K elemental (total).

El tercer grupo no presenta estacionalidad anual (Al y Si) o muestran un descenso en las concentraciones durante invierno (Na). Estos elementos usualmente se relacionan con el polvo natural, aunque también el sodio ha sido relacionado con aerosoles marinos. El descenso de Na durante invierno se debe a su alta solubilidad de este en agua.

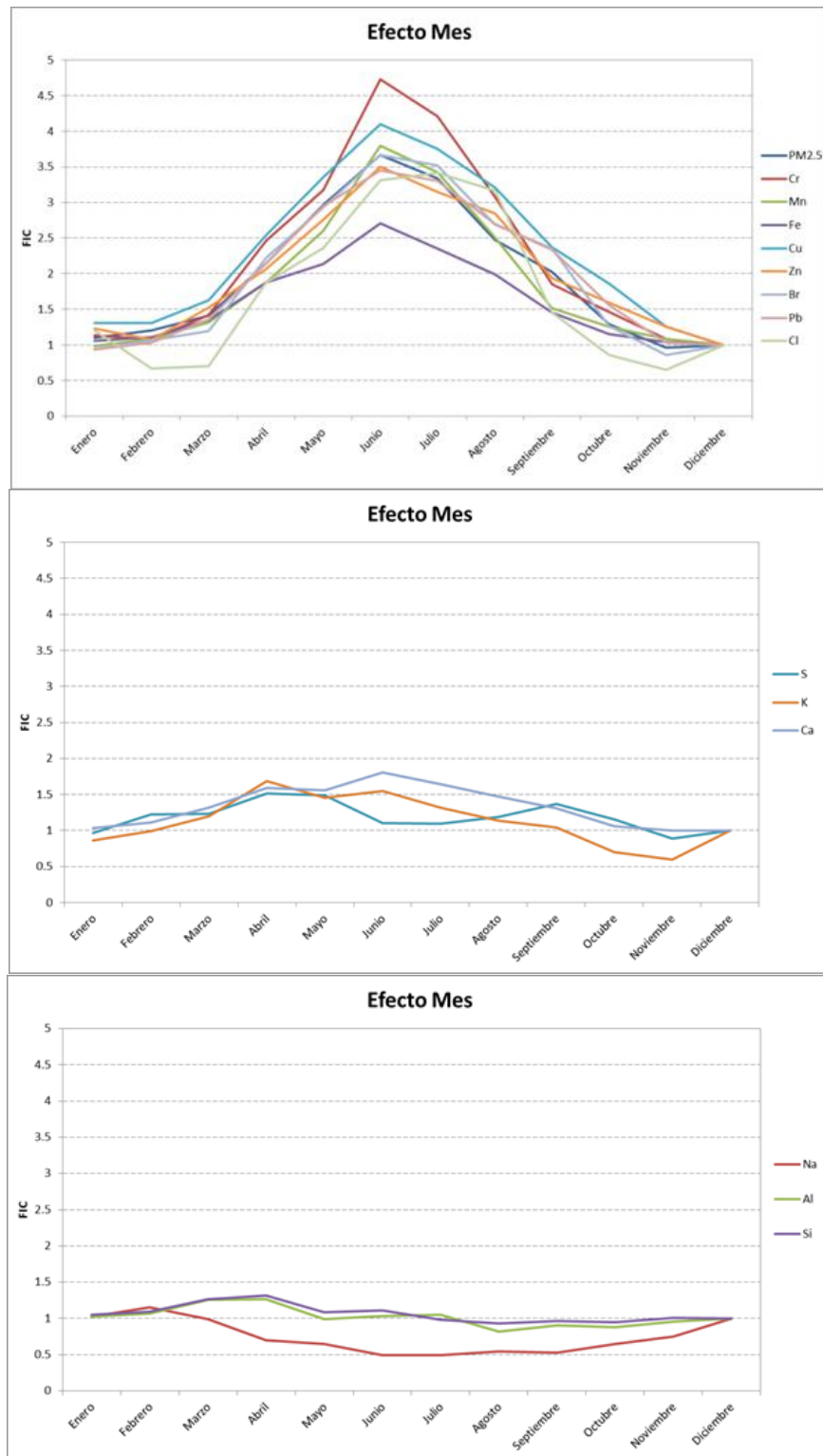


FIGURA 16: FACTORES DE IMPACTO DE CONCENTRACIÓN (FIC) $MP_{2,5}$ Y ELEMENTOS MEDIDOS EN PARQUE O'HIGGINS. EFECTO MES.

3.2.1.3 FIC-EFECTO DÍA DE LA SEMANA

Al igual que el caso anterior, es mejor analizar los elementos acordes como se presentan (Figura 17). Aquellos elementos que presentan variación semanal son consecuencia de fuentes antropogénicas que cesan durante los fines de semana. Aquellos que presentan valores estables pueden estar indicando tanto fuentes naturales como fuentes antropogénicas permanentes. Estas fuentes pueden ser catalogadas como aceites residuales y polvo resuspendido, generados principalmente con el transporte vehicular.

Un primer grupo está caracterizado por un fuerte descenso de concentración durante los fines de semana, a saber Cr, Mn, Cu, y Zn. Las concentraciones durante los días sábado/domingo puede alcanzar los 2 veces menores las medidas durante los días de la semana. Estos elementos se relacionan con la fuente lubricantes y petróleos residuales, por lo que pueden estar obedeciendo al transporte vehicular y a actividades industriales semanales.

Un segundo grupo está caracterizado por un leve descenso de concentraciones en los fines de semana, a saber el Al, Si, Ca, Fe, Pb, y Cl. Durante la semana las concentraciones pueden ser 1.5 veces mayores las determinadas durante los fines de semana.

Un tercer grupo de elementos que no presentan estacionalidad clara durante la semana, a saber el Na, S, K, y MP_{2,5}.

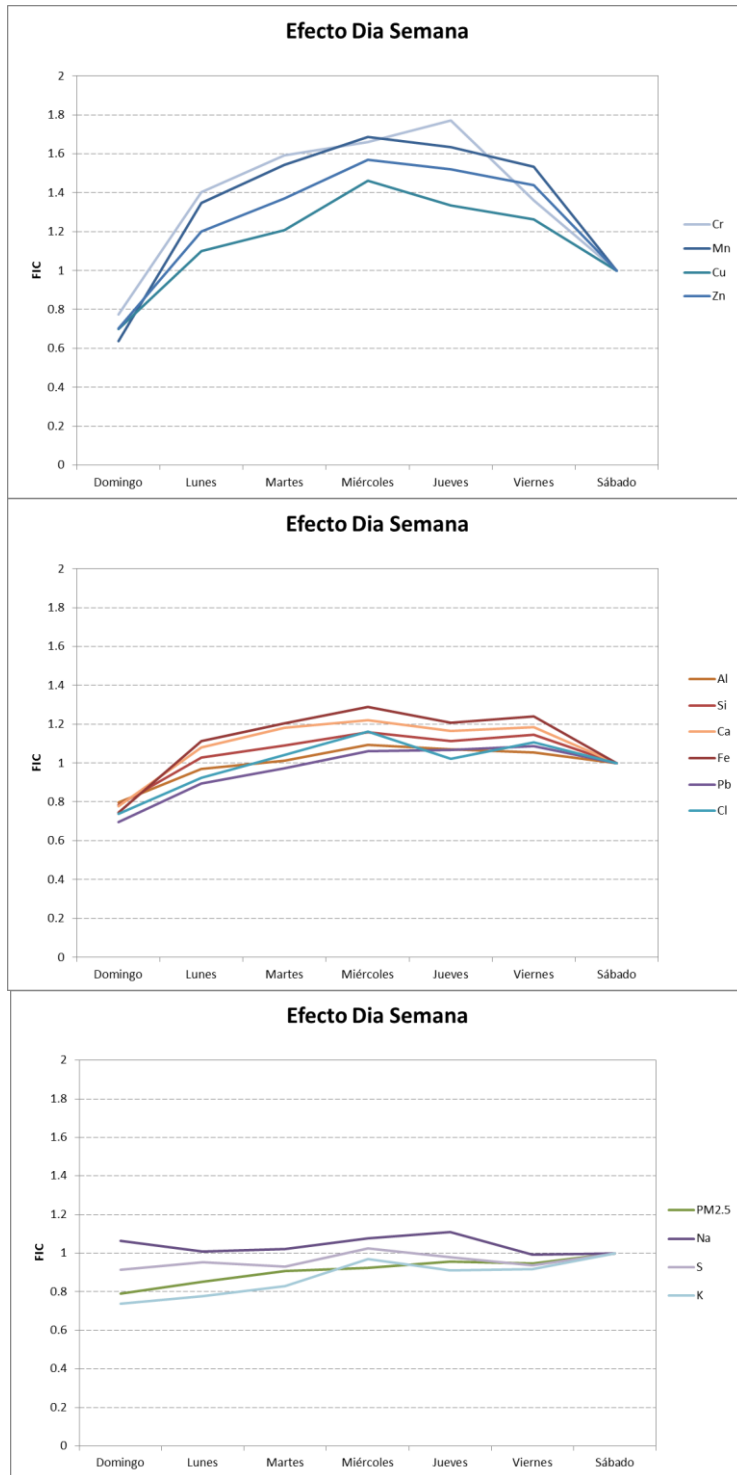


FIGURA 17: FACTORES DE IMPACTO DE CONCENTRACIÓN (FIC) $PM_{2.5}$ Y ELEMENTOS MEDIDOS EN PARQUE O'HIGGINS. EFECTO DIA DE LA SEMANA.

3.2.1.4 FIC-EFECTO VELOCIDAD DEL VIENTO

Es posible observar que la mayoría de los elementos aumenta considerablemente la concentración cuando las velocidades son bajas (en este caso menores que 0.8 m/s). Como excepción se menciona al Na, S, que son altamente solubles en agua.

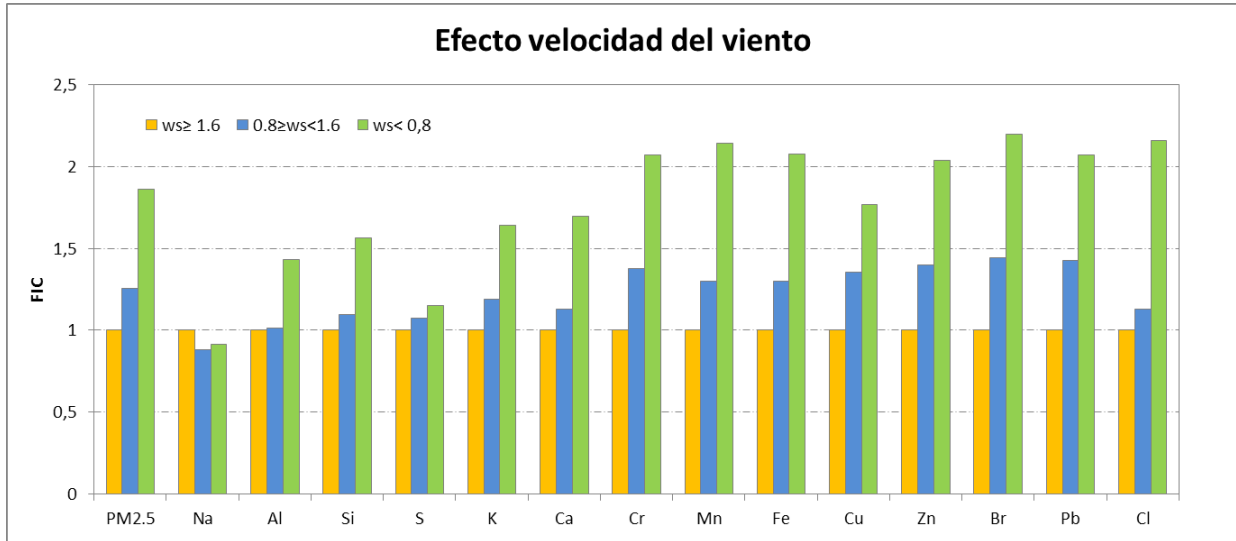


FIGURA 18: FACTORES DE IMPACTO DE CONCENTRACIÓN (FIC) $MP_{2,5}$ Y ELEMENTOS MEDIDOS EN PARQUE O'HIGGINS. EFECTO VELOCIDAD DEL VIENTO

3.2.1.5 FIC-EFECTO TEMPERATURA Y HUMEDAD

El efecto temperatura no posee gran impacto en la concentración de los elementos y $MP_{2,5}$, como se observa en los otros parámetros.

La humedad relativa permite evidenciar un efecto significativo en aumento o descenso en casi todos los elementos, con excepción del $MP_{2,5}$, Na y Br.

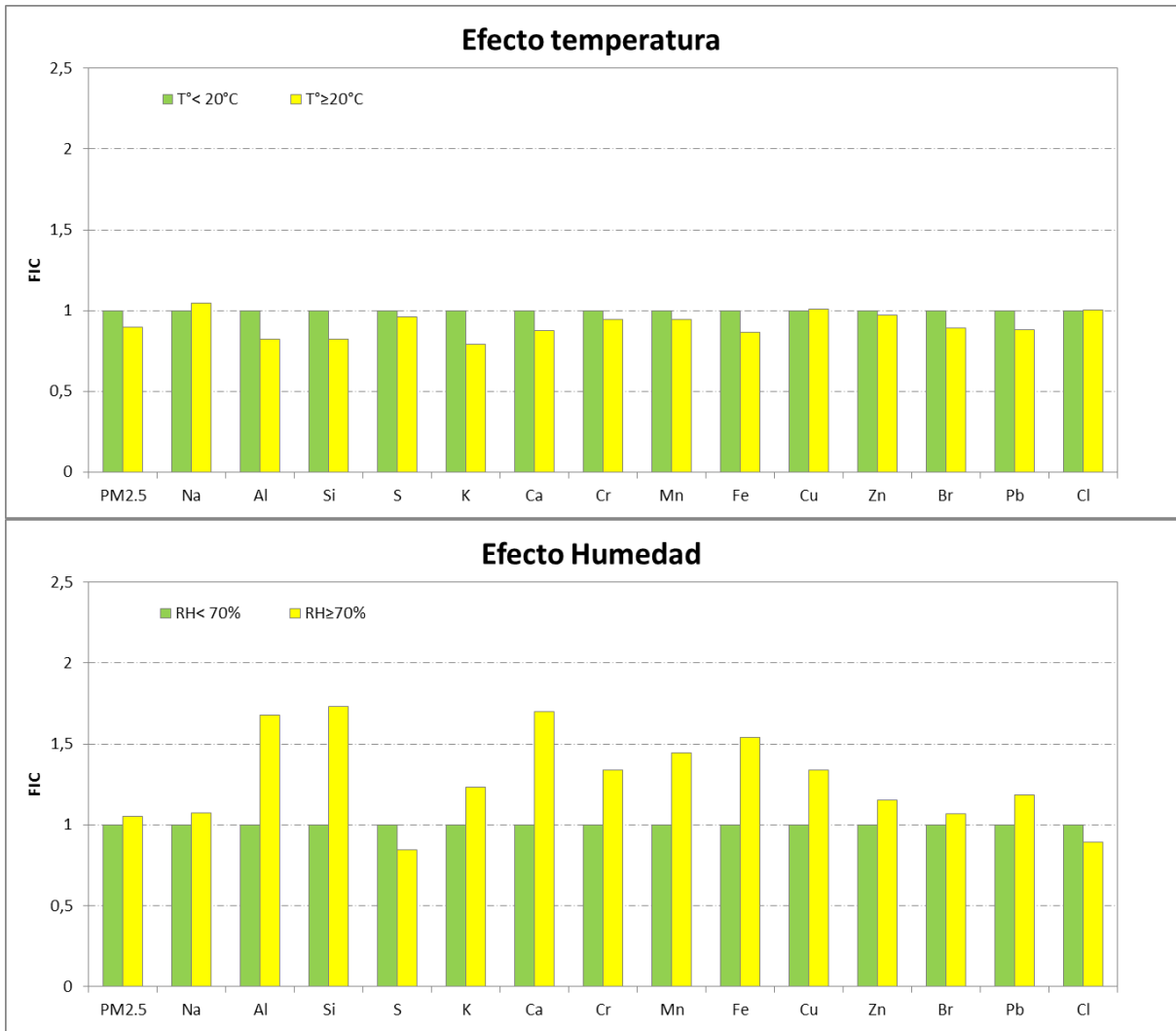


FIGURA 19: FACTORES DE IMPACTO DE CONCENTRACIÓN (FIC) $MP_{2,5}$ Y ELEMENTOS MEDIDOS EN PARQUE O'HIGGINS. EFECTO HUMEDAD RELATIVA.

3.2.2 MATERIAL PARTICULADO GRUESO-MP_{2,5-10}

Como elemento adicional no realizado en los reportes de años anteriores, en esta ocasión se consideró realizar un análisis exploratorio con FIC's al MP_{2,5-10}. Debido a la calidad de la base de datos solo se analizaron filtros provenientes de los últimos dos períodos: 2008-2009 y 2009-2010. De esta manera el efecto año queda fuera del análisis. Los otros efectos son mostrados en las siguientes subsecciones.

3.2.2.1 EFECTO MES

Es reconocido que el MP grueso no presenta estacionalidad invierno verano (caso contrario del MP fino). No obstante el análisis elemental permite evidenciar que ciertos elementos contenidos dentro del MP_{2,5-10} sí presentan una estacionalidad clara, similar a la que se observa al MP_{2,5}.

Para facilitar el análisis del efecto mes (Figura 20), los elementos pueden ser agrupados en tres grupos. El P, Cr, Cu, Zr y Sn aumentan entre 2 a 12 veces en invierno con relación a los valores observados en verano. Llama la atención el alto aumento del P, que puede estar relacionado con enriquecimiento de los fertilizantes en el suelo. Esto tiene fundamento en el hecho que la mayor fuente de P es la agricultura, debido al uso de pesticidas y fertilizantes. La preparación de los terrenos en la RM usualmente comienza en época invernal para tener producción durante los siguientes meses. Si bien durante verano no existe enriquecimiento de P, probablemente debido a que la vegetación ya lo ha absorbido y removido del suelo. La agricultura también puede explicar el aumento del Cu en invierno, ya que usualmente los fertilizantes vienen enriquecidos tanto de P y Cu. La estacionalidad de los elementos Zr, Sn y Cr pueden tener mayor relación con la contaminación del polvo por emisiones industriales.

La mayoría de los elementos se agrupa en un segundo grupo que no presenta estacionalidad, a saber MP_{2,5-10}, Al, Si, S, K, Ca, Ti, Va, Mn, Fe, Zn, Rb, Sr, Pb. En un tercer grupo están aquellos que tienen a bajar de concentración durante los meses de invierno a conocer el Cl, Br, y Mo.

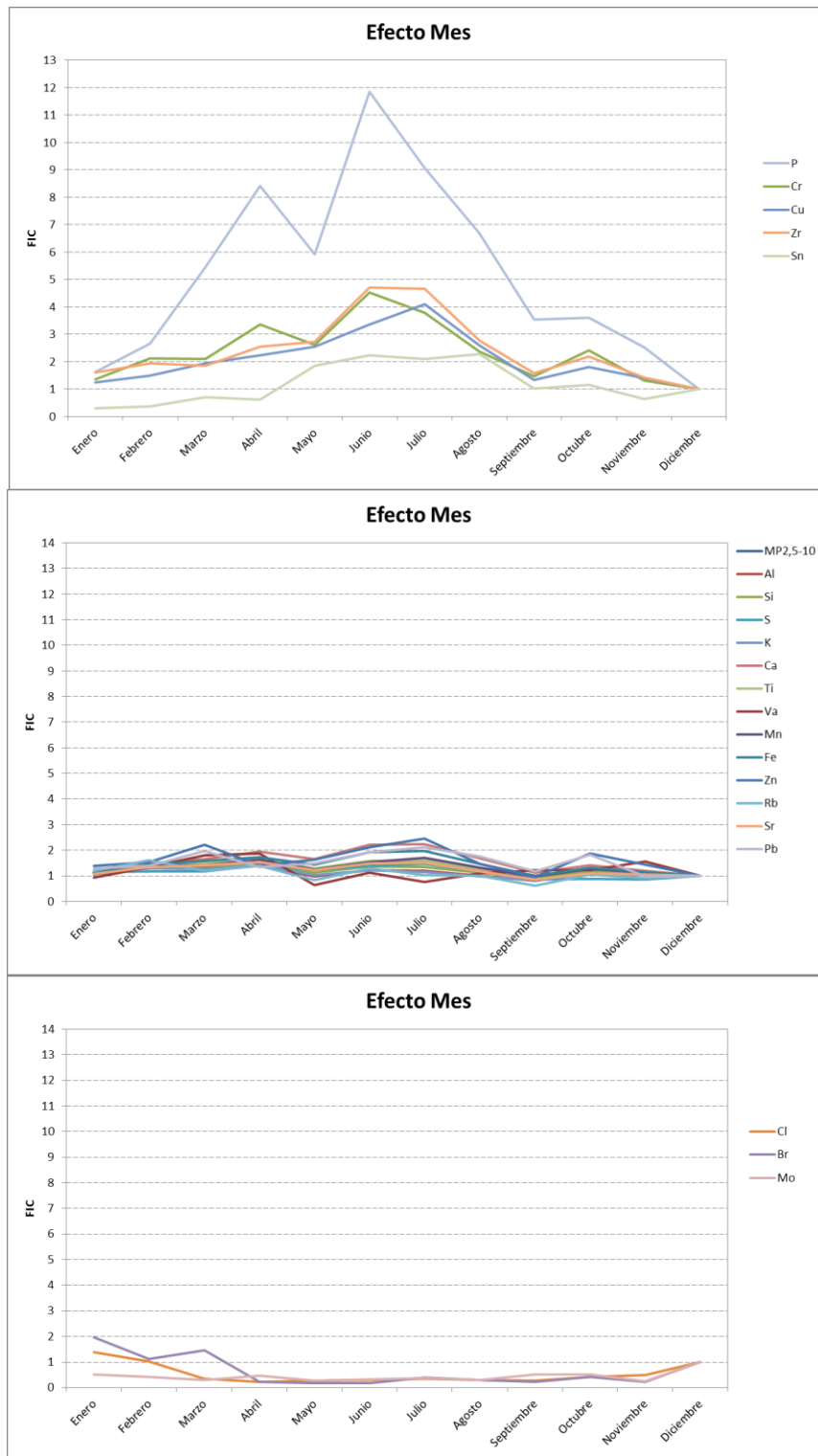


FIGURA 20: FACTORES DE IMPACTO DE CONCENTRACIÓN (FIC) MP_{2,5-10} Y ELEMENTOS MEDIDOS EN PARQUE O'HIGGINS. EFECTO MES.

3.2.2.2 EFECTO DÍA DE LA SEMANA

El análisis semanal indica que solo el Cr presenta un incremento durante los días laborales y un brusco descenso en los fines de semana. La explicación más probable se debe a la existencia particular de fuente metalúrgica que cesa de operar durante los fines de semana, y que contamina el suelo. La concentración puede aumentar hasta tres veces en promedio.

El resto de los elementos tiende a presentar un comportamiento semejante, y aumenta progresivamente de lunes a sábado y baja durante el domingo. Esto puede reflejar cierto grado de acumulación atmosférica durante la semana influenciado por el tráfico vehicular. Los factores de impacto son mostrados en la Figura 21.

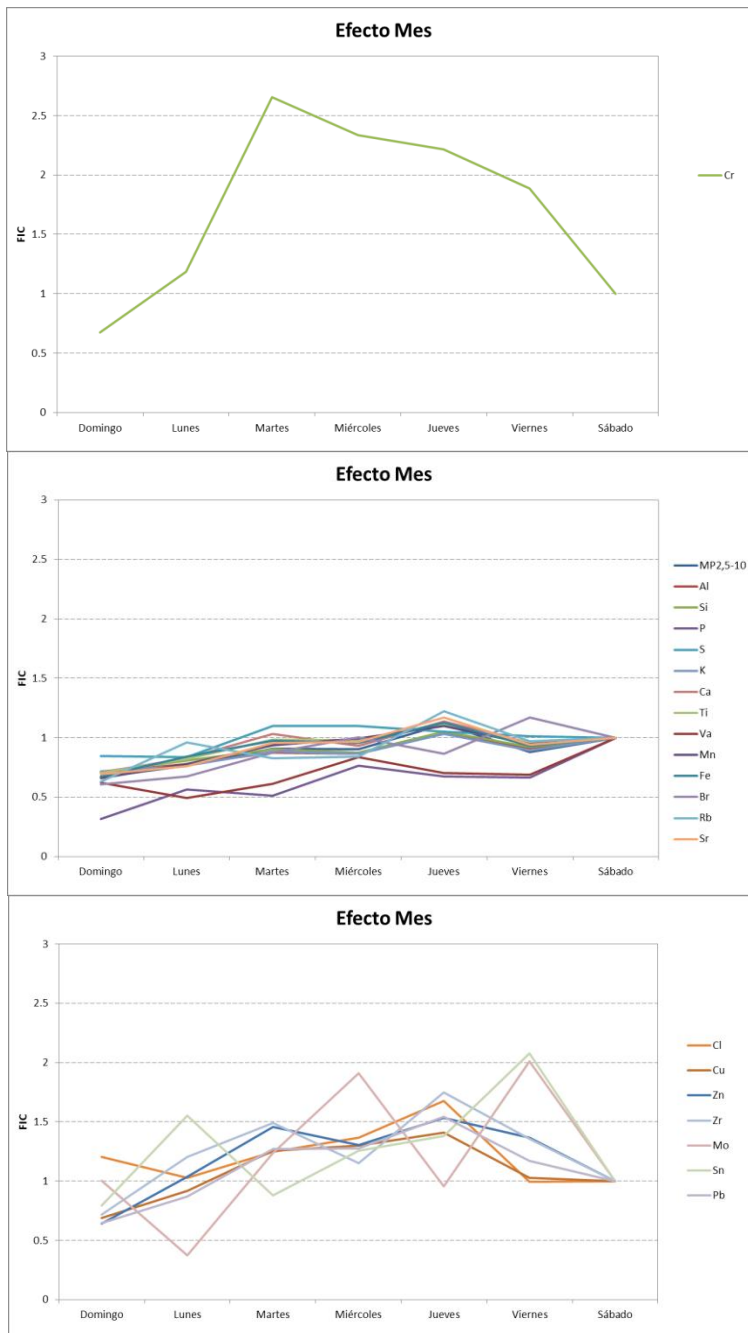


FIGURA 21: FACTORES DE IMPACTO DE CONCENTRACIÓN (FIC) $MP_{2,5-10}$ Y ELEMENTOS MEDIDOS EN PARQUE O'HIGGINS. EFECTO DIA DE LA SEMANA.

3.2.2.3 EFECTO VELOCIDAD DEL VIENTO

En general se observa que la concentración de casi todos los elementos aumenta con un descenso en la velocidad del viento. El Cl es el único elemento que disminuye de concentración a menores velocidades de viento, indicando impacto de sales marinas.

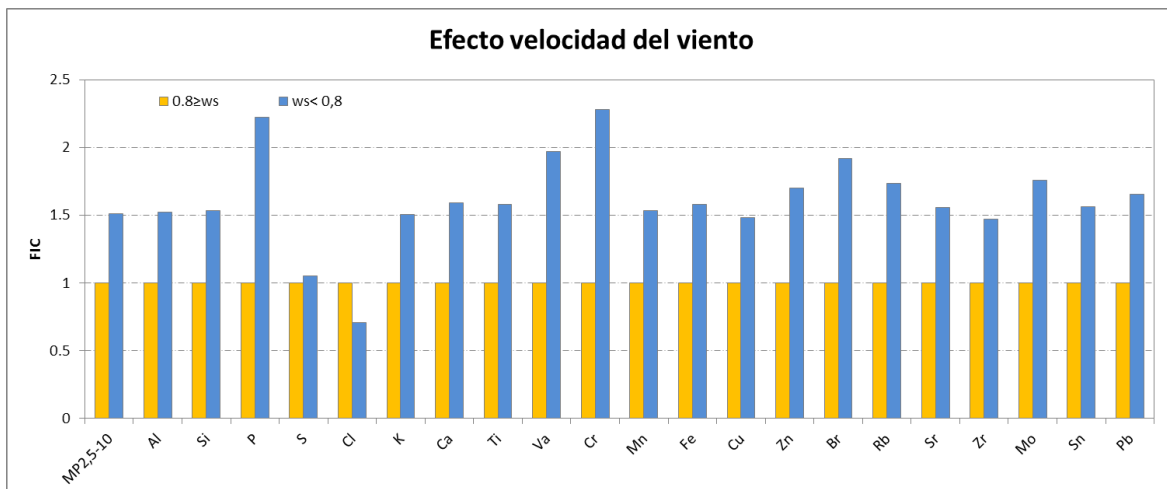


Figura 22: Factores de impacto de concentración (FIC) MP_{2,5-10} y elementos medidos en Parque O'Higgins. Efecto velocidad del viento.

3.2.2.4 EFECTO HUMEDAD Y TEMPERATURA

Se encuentra que a menor humedad las concentraciones de todos los elementos pueden aumentar entre 1,5 a 3,5 veces cuando la humedad es alta. Esto guarda relación con que al aumentar la humedad disminuye la resuspensión del MP, haciendo que el MP grueso no permanezca en la atmósfera. Excepciones a esta tendencia se dan para el S, Br y Mo.

La temperatura tiene un efecto despreciable en casi todos los elementos con excepción del Cl (aumento de 2 veces), Zn (aumento 2 veces), Br (aumento 3 veces), Mo (aumento de 2 veces). Esto puede ser consecuencia de la contaminación del polvo resuspendido en Parque O'Higgins por masas de aire provenientes desde fuera de la ciudad.

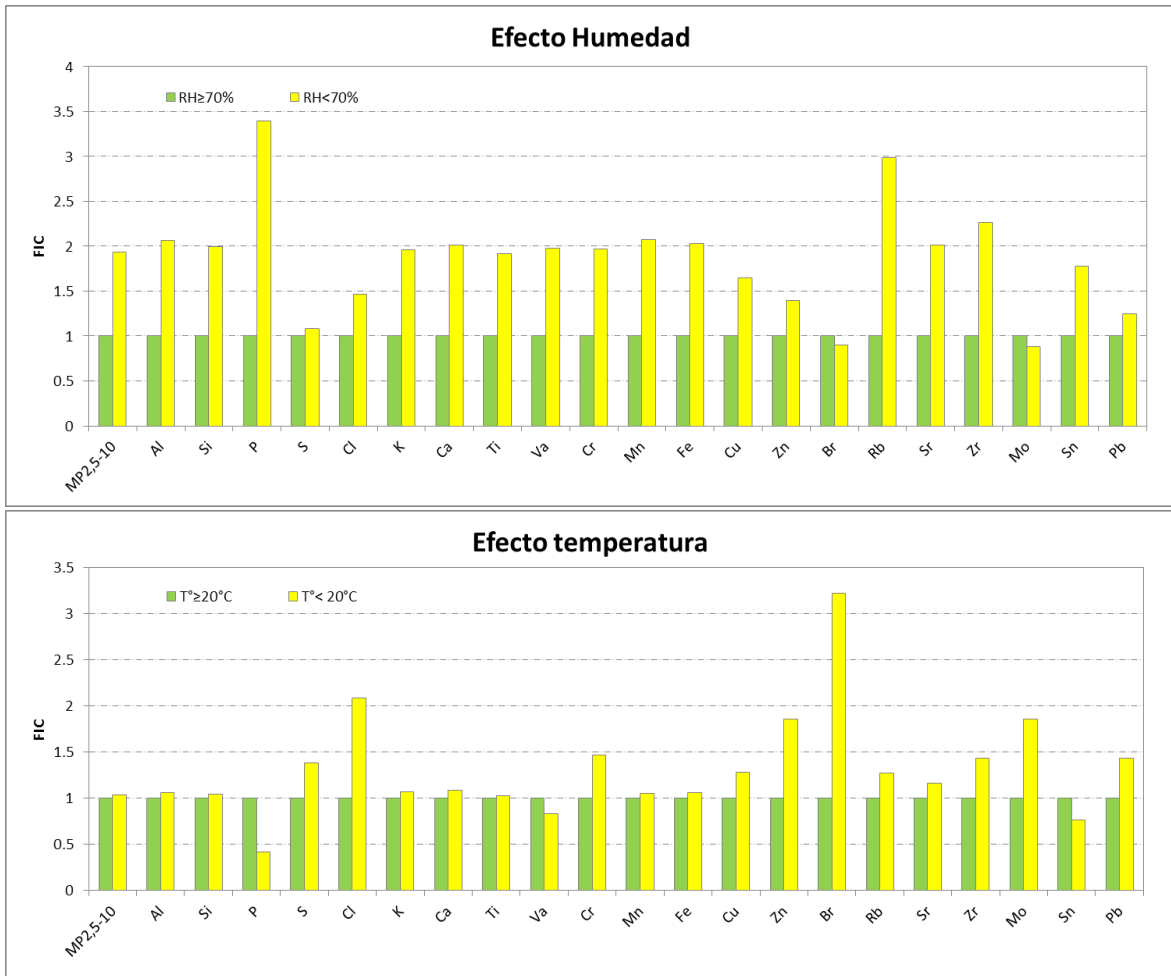


FIGURA 23: FACTORES DE IMPACTO DE CONCENTRACIÓN (FIC) MP_{2,5-10} Y ELEMENTOS MEDIDOS EN PARQUE O'HIGGINS. EFECTO TEMPERATURA Y HUMEDAD.

4 ANÁLISIS FACTORIAL

Se utilizó el análisis de factores como una herramienta estadística para identificar las fuentes asociadas a la contribución de $MP_{2,5}$ para el cual se consideraron los elementos que presentan una completitud sobre el 75% (seleccionando aquellos cuyo valor de concentración sea al menos 2 veces la desviación estándar). En el análisis de factores se utilizó la rotación "oblimin", que maximiza la difusión de la magnitud de las cargas por factor y minimiza la correlación entre factores y; la estimación fue realizada con el método de máxima verosimilitud.

En análisis arrojó 5 factores, los cuales se presentan en la Tabla 7, en esta se muestran las mayores cargas de los elementos a cada factor.

TABLA 7: MATRIZ DE CARGAS DE ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES $PM_{2,5}$

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	factor 5
Na	0.23	-0.30	-0.12	0.15	-0.24
Al	0.97	-0.03	0.12	0.07	-0.17
Si	0.98	0.08	-0.08	-0.07	0.05
S	-0.04	0.38	-0.01	0.00	0.11
Cl	-0.03	0.03	-0.02	0.81	-0.02
K	0.27	0.09	0.04	0.28	0.09
Ca	-0.03	0.06	0.61	-0.01	0.36
Mn	-0.06	0.06	0.82	0.01	-0.06
Fe	0.76	-0.02	0.01	0.04	0.34
Ni	0.05	-0.04	0.97	0.01	-0.04
Cr	0.45	0.02	0.11	0.16	0.61
Cu	0.02	0.01	0.08	0.57	0.02
Zn	-0.05	0.30	0.13	0.28	0.46
Br	-0.01	0.92	-0.02	0.14	-0.04
Pb	0.04	1.02	0.02	-0.08	0.00

En la Tabla 8 se presentan las fuentes asociadas a cada grupo de elementos: Polvo natural, Transporte y polvo contaminado, Actividad industrial y construcción, Aporte inter regional y Combustibles y lubricantes.

TABLA 8: AGRUPACIÓN DE ELEMENTOS POR FACTOR (1998-2010)

Elementos asociados	Fuente asociada
Al, Si, Fe	Polvo Natural
Br, Pb, S	Transporte y polvo contaminado
Ca, Mn, Ni	Actividad industrial y construcción
Cl, Cu, K	Aporte inter regional
Cr, Zn	Combustibles y lubricantes

El aporte porcentual de las fuentes al $MP_{2,5}$ obtenido en el informe "Análisis Retrospectivo de los impactos en Calidad del Aire, Emisiones e Impactos en Salud de los 10 primeros años del Plan de Descontaminación de la Región Metropolitana (1997-2007)" difiere al obtenido en el presente análisis, como se puede observar en las Figura 24 y Figura 25.

En el informe 2007 se obtuvo una fuente asociada a la actividad industrial y al polvo natural que correspondió al 8% del $MP_{2,5}$. Dado el perfil de elementos que se presenta en la Tabla 7, se asoció el primer factor sólo al polvo natural (Si, Al y Fe) representando un 19% al aporte del $MP_{2,5}$.

En el segundo factor se agrupan la actividad industrial y construcción, aportando con un 14%. En este grupo se incluyen los elementos Ni, Mn y Ca. A diferencia del estudio anterior se obtuvo un factor sólo para estas fuente debido a que como se mencionó anteriormente se observa durante los últimos años un aumento de la construcción en la región, influenciando los valores de Ca.

El grupo del Br, Pb y S se corresponde a transporte y polvo contaminado. Esta es una de las fuentes que más cambió su aporte porcentual al $MP_{2,5}$. Desde un 36% a 15%, esto se debe a que la eliminación de los aditivos de las gasolinás (retiro de plomo en el año 2001) se hace más evidente al considerar series de tiempo más extensas (3 años más), y por lo tanto esta fuente tiende a presentar cada vez menos participación en la variabilidad del $MP_{2,5}$.

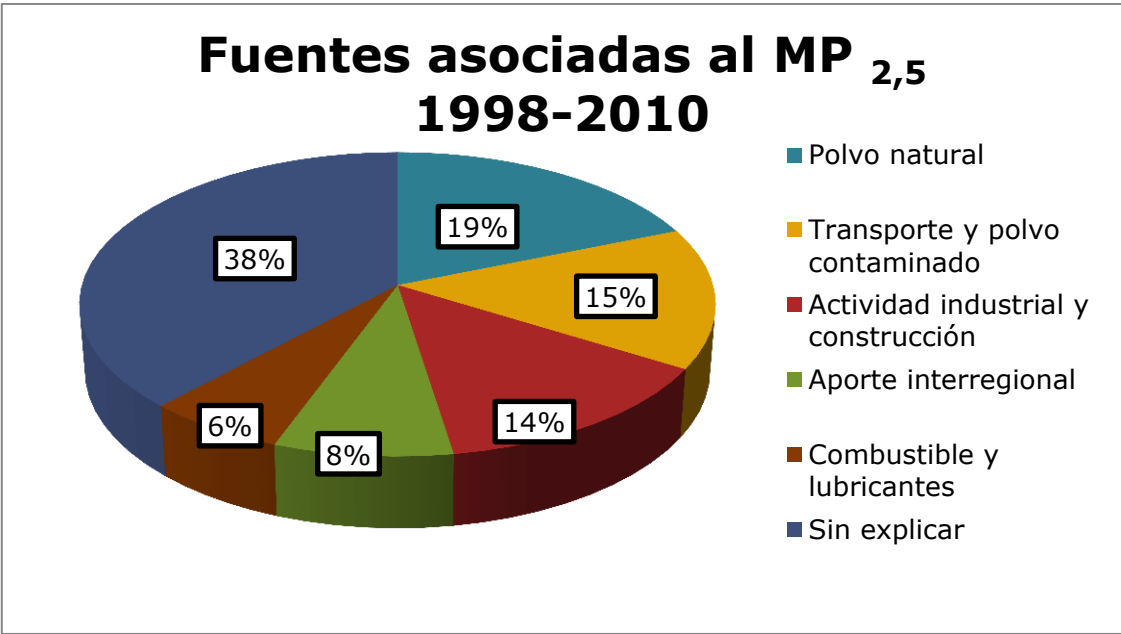


FIGURA 24: APOORTE PORCENTUAL DE FUENTES DE CONTAMINACIÓN AL MP_{2,5}, CONSIDERANDO LA SERIE DEL AÑO 1998 A AGOSTO 2010. PROMEDIO MP_{2,5} DURANTE ESTOS AÑOS: 52,8µg/M³.

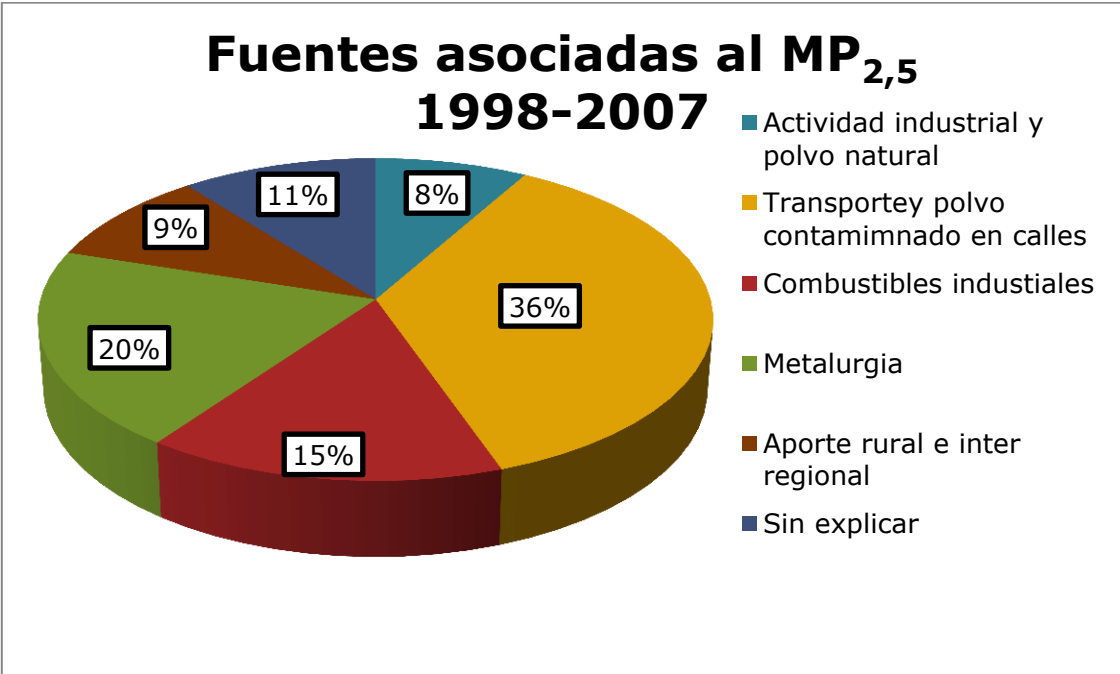


FIGURA 25: APOORTE PORCENTUAL DE FUENTES DE CONTAMINACIÓN AL MP_{2,5}, CONSIDERANDO LA SERIE DEL AÑO 1998 A AGOSTO 2007

TABLA 9: AGRUPACIÓN DE ELEMENTOS POR FACTOR (1998-2007)

Elementos asociados	Fuente asociada
Al-Si-Ca-Cr-Mn-Fe	Actividad industrial y polvo natural
Pb-Br-Cl-Zn	Transporte y polvo contaminado de calles
Ni-Cr	Combustible industrial
S-Se	Metalurgia
K-Cl-S	Aporte rural e inter regional

El aporte interregional agrupa a Cl, Cu, K y aporta un 8% al MP fino, muy similar al 9% del estudio anterior. El Cl y Cu están asociados al aire proveniente de la costa y de las empresas mineras respectivamente, las que están ubicadas fuera de la región. Las concentraciones de K elemental están asociadas a las mayores concentraciones de K⁺ atribuidas a la quema de leña^{11, 12}, la que se estima importante en las áreas rurales y alrededores de la RM.

El Zn y Cr están representados por la fuente ligada a combustibles y lubricantes, puesto que el zinc es utilizado como aditivo para evitar desgastes y oxidación del aceite.

En el presente análisis se obtuvo un 38% de aporte al MP_{2,5} sin explicar, lo cual indica que existen otros compuestos que están adquiriendo mayor participación en esta fracción de material particulado, en especial aerosoles orgánicos primarios y secundarios.

¹¹ Wood burning impact on PM10 in three Austrian regions, Caseiro *et.al.*, Atmospheric Environment, 2009.

¹² Modification in the Soil and Traffic-Related Sources of Particle Matter between 1998 and 2007 in Santiago de Chile, Moreno. F *et.al.*, JAWMA, 2010.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se han presentado antecedentes fundados que indican que medidas implementadas en las antiguas versiones del PPDA de la RM han incidido positivamente en la tendencia hacia la baja de concentración de MP medida en las estaciones Las Condes, Parque O'Higgins y La Paz. Entre las acciones más efectivas se menciona la distribución y uso combustibles más limpios y la introducción de nuevas tecnologías de control de emisiones del transporte. Sin embargo, durante los años 2006-2007 la RM experimentó un punto de inflexión, probablemente ocasionado por las crisis del gas natural. Afortunadamente, en los años 2008-2009 se volvió a recuperar el escenario del período 2004-2005.

Interesante es observar que el acelerado crecimiento económico de ha experimentado la RM no ha incidido negativamente en la calidad del aire por MP, posicionando a Santiago como un buen ejemplo de desarrollo sustentable. Sin embargo hoy en día se constata que los niveles de concentración aún superan tanto los estándares internacionales como las normas de calidad nacional, generando nuevos desafíos a abordar.

Una de las fuentes emisoras que mayor protagonismo ha adquirido durante los últimos años es la quema de biomasa y leña. La composición elemental del $MP_{2,5}$ indica que existe un aporte importante en torno a un 15% que proviene desde sectores periféricos de la RM. Por otra parte hay una 38% de variabilidad de no puede ser explicada por mediciones de elemento, que debiera estar relacionado con la mayor participación de aerosoles orgánicos. Desde este punto de vista, interesante será observar las nuevas medidas que para las estufas a leña, sin embargo tales medidas debieran extenderse más allá de los límites actuales en donde el PPDA rige.

No obstante de lo anterior, el enfoque de la autoridad ambiental será centrar medidas que frenen las emisiones de precursores en lugar de emisión directa. Especialmente el control de emisiones fugitivas y difusas.

Desde el punto de vista de la matriz energética se hace necesario evaluar y diseñar instrumentos que permitan que energéticos como la electricidad adquieran progresivamente un mayor protagonismo en la Región.

Nuevos estudios relacionados con la composición química del $MP_{2,5}$ y precursores orgánicos e inorgánicos entregarán mejores antecedentes para la elaboración y evaluación de la gestiones realizadas para la recuperación de la calidad del aire.

Finalmente, han de requerirse mayores recursos y mejores capacidades para poder enfrentar los desafíos de información que ha de necesitar la gestión de la calidad del aire en la Región en las próximas décadas.

ANEXO I. MUESTREADOR DICOTÓMICO DE MP

El instrumento utiliza un cabezal de MP₁₀ para capturar las partículas menores a 10 μm de diámetro aerodinámico. Las partículas pasan por el cabezal con un flujo constante de 16.7 l/min (1 m³), controlado por un sistema de rotámetros.

En el interior del instrumento las partículas son separadas en MP_{2,5} y MP_{2,5-10} gracias a la disposición de un Impactador virtual. Después de que el aire pasa por el cabezal de MP₁₀, el flujo de aire es dividido en 15 l/min y 1.67 l/min. Gran parte de las partículas no siguen el flujo de mayor velocidad y entonces son capturadas en el filtro de particulado fino. Las partículas gruesas son capturadas en el flujo de 1.67 l/min.



FIGURA 1: EQUIPO DICOTÓMICO

La concentración estándar de partículas en μg/m³ es calculada corrigiendo el volumen colectado en base a mediciones de temperatura y presión (25°C y 760 mm Hg). Para esto se utiliza la siguiente ecuación:

$$MP_{10} \text{ o } MP_{2,5} = \frac{(W_f - W_i) \times 10^6}{V_{std}}$$

MP_x : concentración en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ corregida a las condiciones estándar de presión y temperatura.

W_i : Masa promedio inicial del filtro limpio (g).

W_f : Masa promedio final del filtro expuesto (g).

10^6 : factor de conversión para transformar de g a μg .

V_{std} : volumen (m^3) de aire que pasó a través del filtro, corregido a las condiciones estándares de presión y temperatura.

ANEXO II. ANÁLISIS QUÍMICO POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X

La técnica de Fluorescencia de Rayos X (XRF) ha durante la década pasada ha sido extensamente utilizada (Calzolari, et al., 2008) gracias a que permite obtener concentraciones de elementos desde berilio ($Z = 4$) hasta el americio ($Z = 95$) en concentraciones que van desde 0,1 ppm hasta 100%. El equipo utilizado es un equipo "KeveX 0700/8000 energy-dispersive x-ray fluorescence analyzer".

El espectrómetro consta de un tubo de rayos x de Rodio para generar la excitación primaria. Además tiene un carrusel con 6 elementos adicionales (blancos) para generar otras 6 tipos de rayos x para excitación. Estos elementos adicionales se excitan con el tubo principal de rodio.

Una lista de los elementos utilizados, las energías de rayos x y los elementos que pueden ser analizados por estas líneas se muestra a continuación:

TABLA 10: LISTA DE ELEMENTOS UTILIZADOS PARA ANÁLISIS DE RAYOS X.

Blanco	Elementos Excitados por el blanco
Gadolinium Gd (42.761 Kev)	Líneas K-alfa de Cd In Sn Sb Te I Cs Ba La Ce (Pr)
Antimonio Sb (26.274 Kev)	Líneas K-alfa de Ru Rh Pd Ag
Plata Ag (22.104 Kev)	Líneas K-alfa de Ga Ge As Se Br Kr Rb Sr Y Zr Nb Mo Líneas L-alfa de Ta W Re Os Ir Pt Au Hg Tl Pb Bi Th U
Germanio Ge (9.876 Kev)	Líneas K-alfa de Mn Fe Co Ni Cu Zn Líneas L-alfa de Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu Hf
Hierro Fe (6.400 Kev)	Líneas K-alfa de Sc Ti V Cr Líneas L-alfa de I Xe Cs Ba La Ce Pr Nd
Titanio Ti (4.508 Kev)	Líneas K-alfa de Cl Ar K Ca Líneas L-alfa de Ru Rh Pd Ag Cd In Sn Sb Te Líneas M-alfa de Bi Th U
Rodio directo Rh (2.696 Kev)	Líneas K-alfa de Mg Al Si P S Cl Líneas L-alfa de Ge As Se Br Kr Rb Sr Y Zr Nb Mo Líneas M-alfa de Er Ta W Re Os Ir Pt Au Hg Tl Pb

Se puede ver de la tabla que los elementos desde el Magnesio hasta el Uranio pueden ser analizados usando el blanco apropiado.

Cuando los elementos presentes en la muestra son irradiados por los rayos X primarios emiten a su vez, rayos X característicos del material. La máxima emisión de rayos X secundarios ocurre cuando la energía de excitación es levemente superior. Los rayos X secundarios son detectados por un detector de dispersión de energía (EDS-XRF). Es decir, el detector mide simultáneamente los rayos X provenientes de la muestra y los separa por energía. Este método permite una velocidad de medición mucho mayor que un detector de dispersión de longitud de onda, pudiendo ser desde unos segundos hasta casi 1000 seg. (dependiendo de la concentración de la muestra).

Con respecto al método de análisis, cabe señalar que este mismo enfoque ha sido utilizado en estudios previos realizados por la antigua CONAMA RM. El análisis por fluorescencia de rayos x ha sido realizado en la entidad "Desert Research Institute" en Reno, Nevada, EEUU en la División de Análisis Medioambiental.

Una foto del Espectrómetro de rayos X se muestra en la Figura 26.



FIGURA 26: ESPECTRÓMETRO DE RAYOS X.

La mayoría de las fuentes son conocidas (vehículos a motor, industrias, refinerías, etc.). Sin embargo el análisis elemental permite identificar fuentes específicas (por ejemplo vehículos diesel versus vehículos bencineros) para entender la interrelación entre ellas, y poder implementar medidas de control eficientes.

Las muestras de análisis químicos se realizaron el DRI, – en funcionamiento desde 1985 – tiene la experiencia y equipos necesarios para identificar fuentes a partir de las mediciones obtenidas.